

Escuela Politécnica Superior de Ávila.  
Universidad de Salamanca



# **TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS APLICADAS AL PATRIMONIO CONSTRUIDO**

**Máster en Geotecnologías Cartográficas en  
Ingeniería y Arquitectura. Trabajo final.**

**Septiembre 2011**

**AUTORA: Amaia Mesanza Moraza**

**TUTOR: Javier Gómez Lahoz**



# TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS APLICADAS AL PATRIMONIO CONSTRUIDO

---

## ÍNDICE

1. ANTECEDENTES .....	4
2. OBJETIVOS .....	4
3. LAS TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS .....	7
3.1. Clasificación de las técnicas no destructivas .....	8
4. FUNDAMENTOS FÍSICOS .....	9
4.1. Las ondas electromagnéticas .....	10
4.1.1. Las ecuaciones de Maxwell .....	10
4.1.2. El espectro electromagnético .....	11
4.1.3. Ondas electromagnéticas planas .....	12
4.1.4. Interacción de las ondas electromagnéticas .....	13
4.2. Parámetros electromagnéticos de un medio .....	15
4.3. Termografía y rayos infrarrojos .....	17
4.3.1. Termodinámica básica .....	18
4.4. El láser .....	19
4.4.1. Emisión estimulada y emisión espontánea .....	20
4.4.2. Interferometría .....	21
4.4.3. Propiedades de la luz láser .....	22
4.5. Los rayos X y la tomografía .....	23
4.6 Las ondas acústicas .....	24
5. CARACTERÍSTICAS DE LAS PRINCIPALES TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS .....	25
5.1 Georadar .....	25
5.1.1. Fundamentos del georadar .....	26
5.1.2. Instrumentación .....	27
5.1.3. Métodos de adquisición de datos .....	32
5.1.4. Procesado de los datos .....	38
5.2 Termografías .....	47

5.2.1. Fundamentos de las cámaras termográficas .....	47
5.2.2. Instrumentación .....	49
5.2.3. Métodos de adquisición de datos .....	54
5.2.4. Procesado de los datos.....	57
5.3 Láser escáner.....	61
5.3.1. Fundamentos de los escáneres terrestres .....	63
5.3.2. Instrumentación .....	63
5.3.3. Adquisición de los datos.....	75
5.3.4. Procesado de los datos.....	85
5.4. Metodologías acústicas.....	89
5.4.1. Sistemas acústicos.....	90
6. APLICACIONES DE LAS TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS AL PATRIMONIO CONSTRUIDO.....	93
6.1. Requerimientos de la Arqueología de la Arquitectura.....	93
6.2. Contribución de las TND al estudio del Patrimonio Construido .....	96
6.2.1. La documentación geométrica del edificio .....	97
6.2.2. Contribución de las termografías.....	99
6.2.3. Contribución del georadar .....	105
7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....	109
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	110
9. ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS .....	114

*...la actividad arqueológica verdadera, aquella con la que el arqueólogo se siente plenamente identificado y en la que es consciente de que nadie puede sustituirle, es, ciertamente, el «establecimiento » de hechos. En el caso más general y característico, es decir, en una excavación, al advertir una masa de escombros, al localizar un muro y después otros, al observar cómo se va configurando una planta ... es cuando el arqueólogo distingue entre huesos dispersos y tumbas, entre un simple hogar y un incendio generalizado o localizado; es precisamente cuando lleva a cabo todo esto cuando está cumpliendo con su trabajo y no hay nadie que pueda hacerlo mejor que él, ni nadie que pueda volver a repetir aquella tarea ... él sabe que si comete un error, si observa las cosas incorrectamente o las comprende mal, sus conclusiones serán irremediabilmente falsas y no harán más que llevar a otros errores a todos aquellos que las tengan en cuenta.*

PAUL COURBIN (1988)

# 1ª PARTE

---

## 1. ANTECEDENTES

La realización de este proyecto supone la finalización de los estudios del Máster oficial de Geotecnologías Cartográficas en Ingeniería y Arquitectura ofertado por la Universidad de Salamanca (USAL) e impartido en la Escuela Politécnica Superior de Ávila.

Consta de 12 créditos ECTS y pretende ser el punto de partida de una futura tesis doctoral, por ello, nuestra intención es dotarlo de un carácter investigador.

En la elección del tema a desarrollar han influido de manera notable mi experiencia investigadora en el campo del patrimonio y la arqueología, así como mis estudios y labores docentes en el ámbito topográfico, siendo mi interés al iniciar este proyecto, analizar hasta qué punto arqueología y topografía pueden complementarse en el campo disciplinar de la Arqueología de la Arquitectura.

El proyecto está articulado de un modo muy similar al desarrollo del máster, ya que contempla la adquisición de datos procedentes de diversos sensores (cámaras termográficas y visibles, escáneres láser, o equipos radar), su procesamiento y posterior aplicación en el campo del patrimonio.

El estudio está organizado en 3 partes. La primera de ellas aborda la justificación de la elección del tema y los objetivos que se pretenden alcanzar al finalizar el proyecto; capítulos 1 y 2.

La segunda parte es el grueso del trabajo y consta de 3 capítulos. En la sección 3 se habla acerca de las técnicas no destructivas (TND) en general, así como de las principales asociaciones u organismos implicados en su estandarización y sistematización. El capítulo 4, está dedicado a los fundamentos físicos de estos ensayos, sin profundizar en exceso en ellos, ya que no es el objetivo principal del trabajo y en el apartado 5 se trata de describir los principios, instrumentación, metodología y aplicación de las técnicas no destructivas al patrimonio construido.

La tercera y última parte está dedicada a las conclusiones y a las futuras líneas de investigación que se abren y que pueden dar lugar a la realización de la posterior tesis doctoral.

El proyecto ha sido dirigido por el Dr. D. Javier Gómez Lahoz.

## 2. OBJETIVOS

En el mundo de la arqueología los ensayos no destructivos vienen realizándose desde hace mucho tiempo, fundamentalmente en investigaciones enfocadas a la localización de nuevos yacimientos o a mejorar la información de un área específica (Roskams 2003). La concienciación sobre el elevado coste y carácter destructivo de las excavaciones estimuló la utilización cada vez mayor de estas técnicas (Bahn 1998).

En algunos manuales arqueológicos de referencia (Francovich and Manacorda 2001), (Bahn 1998), (Roskams 2003) se citan la fotografía aérea, la prospección, los sondeos superficiales, la fotografía infrarroja o las prospecciones físicas como algunas de las técnicas más válidas empleadas en arqueología; siempre entendiéndolas como herramientas complementarias al proceso de excavación arqueológica.

Sin embargo, la arqueología no es una sola. Entre las diferentes ramas que la componen está la Arqueología de la Arquitectura que se encarga del conocimiento de la sociedad a través de los materiales arquitectónicos, caracterizándose desde el punto de vista instrumental por el análisis estratigráfico sin renunciar evidentemente a otros instrumentos de carácter tipológico, formal, estructural, arqueométrico o a las fuentes escritas. Tras los primeros trabajos llevados a cabo en Italia, quedó manifiestamente probada la importancia de la estratigrafía en el diagnóstico de los problemas estructurales de un edificio histórico (Azkarate Garai-Olaun, *et al.* 2002).

Lo que se pretende con este estudio es analizar la contribución que mediante los ensayos no destructivos se puede hacer para un mayor conocimiento de los edificios analizados, que ayude tanto al conocimiento histórico-arqueológico como al proyecto de restauración-rehabilitación, sin olvidar en ningún momento el carácter métrico propio de la topografía.

De entre todas estas TND, las sónicas, el radar y los ensayos térmicos son las más extendidas, por lo que serán las que se analicen de manera detallada a lo largo del proyecto (Binda, *et al.* 2000). Además de todas estas técnicas, se tratan de manera pormenorizada todos los aspectos relacionados con el escáner terrestre. La toma de datos con este tipo de instrumento supone la realización de una réplica del edificio analizado, pero además pretendemos que sea la base gráfica sobre la que plasmar los resultados obtenidos con los distintos ensayos. La georreferenciación precisa de hallazgos o restos arqueológicos, supone sin lugar a dudas, una aportación importante a los estudios arqueológicos y arquitectónicos.

Tal y como se recoge en la Carta de Londres<sup>1</sup> (versión 1.1 del 16 de junio de 2006), sobre la visualización tridimensional en la investigación y divulgación del patrimonio cultural, es necesario garantizar que los métodos de visualización tridimensional sean aplicados con rigor académico y cuando las investigaciones comprendan este tipo de representación, es imprescindible la diferenciación entre las evidencias y las hipótesis. Uno de sus objetivos es precisamente permitir que la visualización tridimensional contribuya plenamente al estudio, interpretación y gestión de los bienes culturales.

Con todo esto, los objetivos que nos proponemos al realizar este trabajo son:

- 1) Analizar la contribución que algunas de las técnicas no destructivas más significativas pueden hacer al estudio de la Arqueología de la Arquitectura.

---

<sup>1</sup> <http://www.londoncharter.org>

La carta de Londres es hasta la fecha el documento internacional que más ha avanzado en temas de visualización tridimensional. En el año 2009 se redactó la versión 2.1 enfocándola hacia la visualización computerizada del Patrimonio Cultural, y actualmente (junio 2011) se está trabajando en el borrador de la Carta de Sevilla que viene a ampliar el campo de aplicaciones reflejado en la Carta de Londres.

- 2) Estudiar la posibilidad de georreferenciar los datos obtenidos con los distintos sensores en una única plataforma gráfica.

Como se desprende del título, el trabajo está enfocado fundamentalmente hacia el patrimonio construido, sin que esto suponga la exclusión de los yacimientos arqueológicos. En muchos proyectos de lecturas estratigráficas de alzados, la excavación del subsuelo constituye una parte importante de los mismos, ya que los restos que pudieran aparecer aportan una valiosa información para la comprensión del edificio en cuestión.



## 2ª PARTE

### 3. LAS TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS

Si atendemos a su grado de intrusismo, las diferentes técnicas de análisis que se pueden aplicar al estudio de un determinado edificio pueden clasificarse en Ensayos no destructivos (NDT- *Non Destructive Techniques*), Técnicas de destrucción secundaria o menor (MDT- *Minor Destructive Tests*) y Técnicas Destructivas (DT- *Destructive Tests*), si bien en algunas ocasiones es necesaria la combinación de varias de ellas para la obtención de un resultado óptimo (Bosiljkov, *et al.* 2010). El método más empleado es sin duda la inspección visual, aunque en los últimos años, la tendencia hacia el uso de técnicas no destructivas (TND) y de técnicas de destrucción menor (MDT) ha ido claramente al alza debido principalmente a una mejora significativa de la tecnología necesaria para realizar dichas evaluaciones *in situ* (Orbán and Gutermann 2009).

Normalmente, los ensayos destructivos únicamente requieren de información acerca de las propiedades mecánicas del elemento estudiado, pudiendo aplicarse de manera integral o parcial, a expensas de disponer de más datos fiables. Sin embargo, las técnicas de destrucción menor se fundamentan en mediciones hechas *in situ* y que proporcionan una información cualitativa importante del elemento, así como datos adicionales sobre su estructura interna. Ocasionalmente, es interesante la monitorización de los sistemas afectados de tal forma que sirva tanto de prevención como de control de la evolución de grietas o deformaciones. El conocimiento y puesta en marcha de estos sistemas puede prevenir de muchos y serios problemas e incluso del colapso total de la estructura.

Plan Director de la Restauración de la Catedral de Santa María de Vitoria				
Herramientas para la investigación				
ENSAYOS	IN SITU Realizados en el momento	NO DESTRUCTIVOS Realizados sin manipulación, ni alteración del material	Organolépticos	Características externas: color, textura, degradación, humedad, etc.
			Topografía, Fotogrametría	Coordenadas (xyz) de puntos. Planimetría tridimensional
			Endoscopia, Termografía, Magnetometría, Sonido, Ultrasonido, Rayos X	Visibilidad en zonas inaccesibles. Diferencia temperaturas en material. Metales no visibles. Homogeneidad, resistencia material. Espesor, hoquedad, porosidad. Elementos ocultos en material
			Extensometría, Convergencia, Clinometría	Apertura de fisuras. Separación entre planos. Comprobación de verticalidad
			Gato plano	Estado tensional y módulo elástico
		DESTRUCTIVOS Realizados sobre el material con alteración del mismo	Estación climatológica, Humidímetro	Temp. y humedad relativa ambiental. Pluviometría, contaminantes. Humedad relativa del material
			Estratigrafía de muros	Individualización de USM. Cronología relativa de las USM. Estudio histórico. Proceso de transformación en el tiempo
			Extracción de muestras, Sondeos con testigo	Superficial o interna por sondeo. Estratigrafía y composición del testigo
			Penetrómetro	Resistencia del suelo al golpe
			Ejecución de catas, Excavación arqueológica	Descubrimiento de elementos ocultos. Estratigrafía suelo. Individualización US. Cronología relativa de las US.
LABORATORIO Realizados sobre muestras y datos extraídos del monumento		FÍSICOS	Obra de restauración	Demolición de elementos degradados. Descubrimiento de elementos ocultos
			Vaciado de archivo	Localización e interpretación de documentación histórica (textos, planos, fotos)
			Dendrocronología	Resistencia del suelo al golpe
			Densidad, porosidad, coeficiente de saturación y absorción. Resistencia rotura en seco y saturado a compresión, flexión, tracción, flexión, dilatación, capilaridad, evaporación y dureza superficial	Características físicas y mecánicas de los materiales
		QUÍMICOS	Lámina delgada, Contenido en sales, Cristalización, Reacción contaminantes, Envejecimiento acelerado	Análisis composicional. Componentes mineralógicos. Interacción de los materiales con los agentes externos y durabilidad

Figura 1. Diferentes tipos de ensayos aplicados en la restauración de la Catedral de Santa María, en Vitoria-Gasteiz.

El fracaso, en la restauración y rehabilitación de algunos edificios históricos, hizo patente la necesidad de disponer de estudios, previos a cualquier tipo de intervención, que informasen sobre el estado del inmueble. Serían precisamente algunas de las TND existentes las que se encargasen de realizar estos ensayos previos y sobre las que se va a tratar en este proyecto.

Se conoce como técnicas no destructivas a aquellos ensayos que no alteran de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales del material sobre el que se aplican, es decir, aquellas que suponen un impacto mínimo sobre el objeto estudiado. Su escaso impacto tiene como inconveniente que ofrece una información de tipo cualitativo y generalmente menos precisa que la que se obtiene con los ensayos destructivos, no contribuyendo en ningún caso con datos sobre las propiedades mecánicas de la estructura.

El uso de este tipo de técnicas se remonta a 1868, cuando se comenzó a trabajar con campos magnéticos para la detección de grietas superficiales en ruedas y ejes de ferrocarril. Décadas más tarde, en el año 1941 se funda la Sociedad Americana para Ensayos No Destructivos (ASNT)<sup>2</sup> que es actualmente la sociedad más grande especializada en el mundo de las pruebas no destructivas, creadora de estándares en este campo de actuación. A esta organización le siguieron otras y actualmente la institución que reúne a todas ellas es el Comité Internacional de Ensayos No Destructivos (ICNDT)<sup>3</sup> con su sede en Viena.

Localmente, la organización que se encarga de estos aspectos es la AEND<sup>4</sup> -Asociación Española de Ensayos No Destructivos- constituida en 1988 y que se encarga de la formación, certificación y difusión<sup>5</sup> sobre ensayos no destructivos.

### 3.1. Clasificación de las técnicas no destructivas

Los métodos no destructivos empleados en la estimación de las propiedades de los materiales pueden clasificarse de maneras diversas (Iñiguez González 2007). Si atendemos a la naturaleza de la técnica en la que se basan podemos hablar de:

- ✓ Inspección visual: endoscopia y videoendoscopia.
- ✓ Métodos mecánicos: aquellos que se basan en la aplicación de fuerzas y medición de las deformaciones. Dentro de este grupo se encuentran las pruebas de carga, la clasificación mecánica, el sondeo con penetrómetro, con resistógrafo y el arranque de tornillo.
- ✓ Métodos acústicos: se basan en la determinación de la velocidad de transmisión del sonido en el material y otras mediciones de naturaleza acústica. Entre ellos se encuentran la velocidad de pulso sónico, la velocidad de pulso ultrasónico, el impacto eco, la tomografía sónica o ultrasónica.
- ✓ Métodos electromagnéticos: son los basados en las mediciones efectuadas mediante corrientes eléctricas o campos magnéticos. Ejemplos de estos son las técnicas

---

<sup>2</sup> <http://www.asnt.org/>

<sup>3</sup> <http://www.icndt.org/>

<sup>4</sup> <http://www.aend.org/>

<sup>5</sup> Próximamente, se celebrará en Valencia el 12º Congreso Español de Ensayos no Destructivos al que precederá el *6th International Conference on Certification and Standardization NDT*.

termográficas, las técnicas radar, la tomografía de radar o la tomografía axial computerizada.

- ✓ Métodos nucleares: son los que emplean los rayos X, los rayos Gamma y la resonancia magnética.

MÉTODO	DESCRIPCIÓN	RESULTADOS	VENTAJAS/ DESVENTAJAS
<b>Georadar</b>	Se trata de pulsos electromagnéticos transmitidos al material y después registrados por una antena receptora.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Detección de huecos</li> <li>• Geometrías ocultas</li> <li>• Distribución de humedades</li> </ul>	Alta capacidad de penetración y buenos resultados de la estructura interna. Relativamente rápida pero necesita de personal especializado para su interpretación.
<b>Termografía infrarroja</b>	Recoge la radiación térmica de la superficie analizada con una cámara de infrarrojos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificación a distancia de materiales</li> <li>• Detección de zonas húmedas</li> </ul>	Un método de detección remota que no tiene ningún contacto con la superficie analizada. Penetra muy pocos centímetros en el material y se necesita de personal formado para su interpretación.
<b>Auscultación sónica</b>	Ondas sonoras que se transmiten a través de una estructura a una velocidad proporcional a las propiedades del material.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Detección de huecos y grietas</li> <li>• Geometría oculta</li> <li>• Integridad estructural</li> </ul>	Tiene una alta capacidad de penetración y ofrece información muy valiosa de la estructura interna analizada. Requiere personal especializado para una buena interpretación.
<b>Boroscopia</b>	Una pequeña cámara insertada en zonas muy estrechas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificación de materiales</li> <li>• Detección de huecos y defectos</li> <li>• Calibración de otros ensayos</li> </ul>	Provee información muy localizada.

Tabla 1. Esquema de los principales métodos no destructivos empleados.

## 4. FUNDAMENTOS FÍSICOS

A lo largo de este capítulo se tratará de explicar algunos de los conceptos físicos necesarios para poder entender más fácilmente el funcionamiento de las técnicas explicadas más adelante en la sección 5. No se trata de hacer un desarrollo matemático y físico detallado, sino más bien exponer los contenidos fundamentales que ayuden a su comprensión.

Las ondas y el comportamiento ondulatorio de las mismas, será la conexión a todos los ensayos analizados. Se entiende por movimiento ondulatorio aquel proceso por el que se propaga energía de un lugar a otro sin transferencia de materia, mediante ondas mecánicas o electromagnéticas.

Las ondas mecánicas se denominan así porque la energía se transmite a través de un medio material (sólido, líquido o gaseoso) sin ningún movimiento global del propio medio; las partículas oscilan en torno a su posición de equilibrio y solo la energía avanza de forma continua. La velocidad se puede ver afectada por algunas características del medio como la

homogeneidad, la elasticidad, la densidad y la temperatura. Dentro de las ondas mecánicas tenemos las ondas elásticas, las ondas sonoras y las ondas de gravedad.

Las únicas ondas que no requieren de un medio material para su propagación son las ondas electromagnéticas, en cuyo caso las oscilaciones se deben a variaciones en la intensidad de los campos eléctricos y magnéticos. Estas ondas, que pueden propagarse en el vacío, viajan a una velocidad aproximada de 300.000 km/s. El espectro electromagnético será el que se encargue de la distribución energética del conjunto de ondas electromagnéticas.

#### 4.1. Las ondas electromagnéticas

Para poder definir con determinación qué es la luz, fue preciso que Maxwell en 1867 enunciara sus ecuaciones; en ese momento, electricidad y magnetismo se unieron en la disciplina que conocemos como electromagnetismo. Las ecuaciones de Maxwell muestran que un campo magnético ( $\vec{B}$ ) variable en el tiempo actúa como fuente de campo eléctrico, y que un campo eléctrico ( $\vec{E}$ ) que varía con el tiempo genera un campo magnético (cuando no varían con el tiempo, es posible analizarlos de forma independiente). Estos campos se sostienen uno al otro y forman la onda electromagnética que se propaga a través del espacio (Young and Freedman 2009).

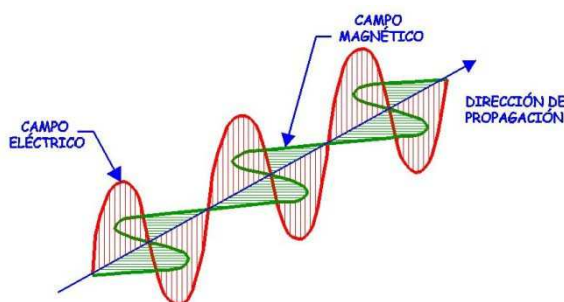


Figura 2. Onda luminosa con el campo eléctrico en vertical y el campo magnético en horizontal.

##### 4.1.1. Las ecuaciones de Maxwell

Maxwell descubrió que los principios básicos del electromagnetismo podían sintetizarse por medio de cuatro ecuaciones:

- 1) Ley de Gauss de los campos eléctricos, que relaciona el flujo eléctrico a través de una superficie cerrada y la carga eléctrica encerrada en dicha superficie:

$$\oint \vec{E} d\vec{A} = \frac{Q_{encerrada}}{\epsilon_0}$$

- 2) Ley de Gauss de los campos magnéticos que expresa la inexistencia de cargas magnéticas:

$$\oint \vec{B} d\vec{A} = 0$$

- 3) Ley de Ampère que explica, que la circulación de la intensidad del campo magnético en un contorno cerrado es igual a la corriente que lo recorre en ese contorno:

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \left( i_c + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right)$$

#### 4) Ley de Faraday

$$\oint \vec{E} d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Cuando se trabaja en medios homogéneos, las ecuaciones tienen una expresión sencilla, relacionando todas estas magnitudes por medio de la permitividad eléctrica ( $\epsilon$ ), la conductividad ( $\mu$ ) y la permeabilidad magnética ( $\sigma$ ) del material. Generalmente los medios estudiados son anisótropos, por lo que la relación entre las magnitudes se hace a través de los tensores de la permitividad, permeabilidad y conductividad.

De acuerdo a estas ecuaciones, una carga puntual en reposo produce un campo eléctrico estático, pero no un campo magnético; una carga puntual en movimiento con velocidad constante produce los dos campos. Por tanto para que una carga puntual produzca ondas electromagnéticas, la carga debe acelerar, siendo este uno de los resultados de las ecuaciones de Maxwell.

#### 4.1.2. El espectro electromagnético

Las ondas electromagnéticas cubren un espectro extremadamente amplio de longitudes de onda y frecuencia que incluye las ondas de radio, de televisión, la luz visible, la radiación infrarroja y la ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma.

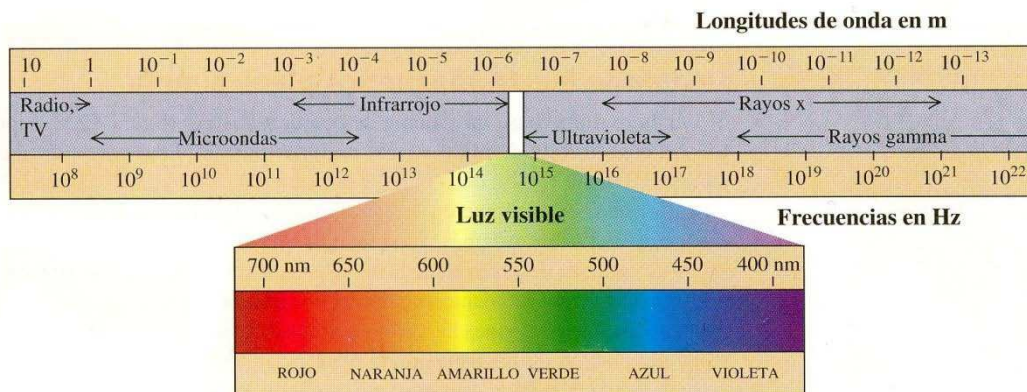


Figura 3. Espectro electromagnético.

Las distintas ondas electromagnéticas se diferencian entre sí por su frecuencia ( $f$ ) y longitud de onda ( $\lambda$ ); sin embargo, todas tienen la misma velocidad de propagación en el vacío ( $c = 299.792,458$  m/s) cumpliéndose la expresión  $c = \lambda f$ . Cuando estas ondas viajan a través de la materia, la velocidad de la onda ya no mantendrá ese valor  $c$ , sino que será uno menor, denotado por  $v$  (velocidad en otro medio que no es el vacío). La relación entre la velocidad en el vacío y la velocidad en otro medio es lo que se denomina índice de refracción y que explicaremos más adelante.

Los humanos solo detectamos una parte muy pequeña de este espectro que denominamos luz visible, en concreto aquella con una longitud de onda comprendida entre los 400 y los 700nm. Dado que la luz blanca ordinaria incluye todas las longitudes de onda visibles, es preciso recurrir al uso de filtros especiales para seleccionar una banda determinada, que será aproximadamente monocromática. En la práctica, conseguir luz de este tipo con una sola longitud de onda es una idealización inalcanzable. La luz láser presente en los escáneres terrestres, está precisamente mucho más cerca de ser monocromática que cualquiera que se obtenga de otra manera.

En cualquier caso, existen otras formas invisibles de la radiación electromagnética, no menos importantes, como son las ondas de radio, de televisión, las microondas, o las ondas infrarrojas empleadas en las cámaras termográficas.

#### 4.1.3. Ondas electromagnéticas planas

Para poder definir una onda plana<sup>6</sup> partimos de un sistema de coordenadas  $xyz$ , suponiendo que todo el espacio queda dividido en dos partes por el plano  $yz$ . En cada punto a la izquierda de este plano hay un campo eléctrico en la dirección  $+y$  y un campo magnético en la dirección  $+z$  (ver figura 4). Suponemos además que el plano límite, denominado frente de onda, se desplaza hacia la derecha en el eje  $+x$  con velocidad constante  $c$ .

Esta sería la situación normal de una onda electromagnética; una onda en la que en cualquier instante los campos son uniformes en toda la extensión de todo plano perpendicular a la dirección de propagación. Esto es a lo que se denomina onda plana.

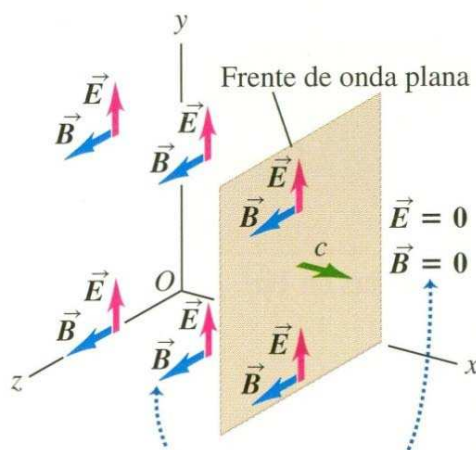


Figura 4. Frente de una onda electromagnética.

Esta onda plana ha de ser coherente con las ecuaciones de Maxwell anteriormente expuestas, para lo cual el frente de onda debe desplazarse con la rapidez de la luz y los campos eléctricos y magnéticos deben ser perpendiculares a la dirección de propagación, es decir, la onda ha de ser transversal. A diferencia de las ondas mecánicas, las ondas electromagnéticas no necesitan

<sup>6</sup> De todas las posibles soluciones de ecuaciones de ondas, nos decantaremos por las ondas armónicas planas, ya que tal y como quedó demostrado en el teorema de Fourier cualquier onda puede descomponerse en la suma de ondas armónicas planas uniformes (Gómez López 2008).



de un medio para transmitirse; lo que se modula en una onda de este tipo son los campos eléctricos y magnéticos.

#### 4.1.4. Interacción de las ondas electromagnéticas

Las ondas viajan a través de los materiales y en su camino experimentan la acción de tres procesos básicos: reflexión, refracción y atenuación.

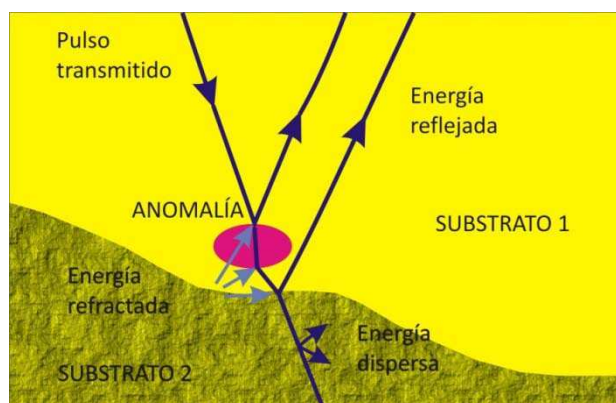


Figura 5. Proceso de reflexión, refracción y pérdida de energía de una onda.

Cuando una onda luminosa incide en una superficie lisa que separa dos materiales transparentes (ej. aire y vidrio, o aire y agua), la onda en general es reflejada parcialmente y también refractada parcialmente hacia el segundo material.

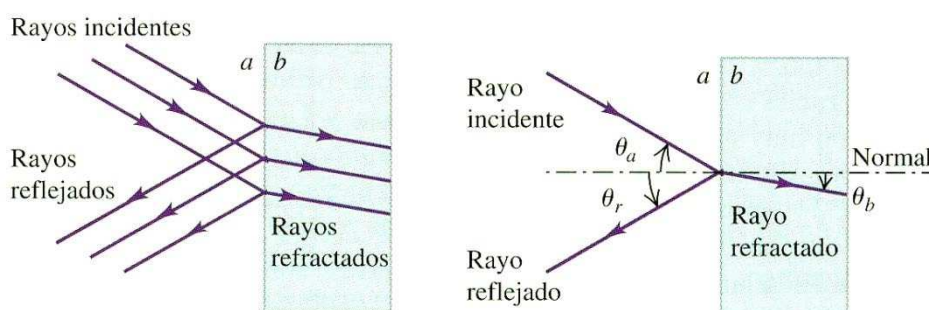


Figura 6. Representación de la reflexión en dos medios. A la izquierda representación con varios rayos, y a la derecha representación simplificada

La reflexión con un ángulo definido desde una superficie muy lisa se denomina reflexión especular, mientras que la reflexión dispersa a partir de una superficie áspera se llama reflexión difusa. Ambas clases de reflexión tienen lugar con materiales transparentes o materiales opacos que no transmiten la luz.

El índice de refracción de un material óptico, comúnmente denotado por  $n$ , es fundamental en la óptica geométrica. Es la razón entre la velocidad de la luz ( $c$ ) en el vacío y la velocidad de la luz en el material ( $v$ ). La luz siempre viajará más lenta en el material que en el vacío por lo que el valor de  $n$  siempre será mayor que la unidad.

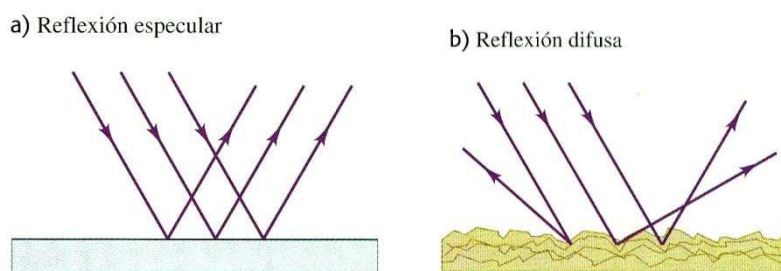


Figura 7. Tipos de reflexión.

Los estudios experimentales de las direcciones de los rayos reflejados y refractados dieron lugar a los siguientes enunciados:

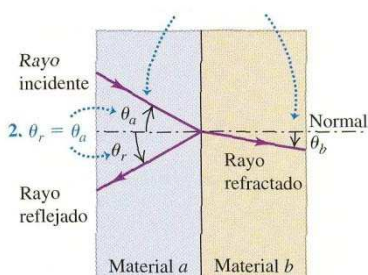


Figura 8. Leyes de reflexión y refracción

1. Los rayos incidente, reflejado y refractado, así como la normal a la superficie están todos en el mismo plano.
2. El ángulo de reflexión  $\theta_r$  es igual al ángulo de incidencia  $\theta_a$  para todas las longitudes de onda y para cualquier par de materiales.
3. La razón de los senos de los ángulos  $\theta_a$  y  $\theta_b$ , donde los dos ángulos están medidos a partir de la normal a la superficie, es igual al inverso de la razón de los dos índices de refracción.

$$\frac{\text{sen } \theta_a}{\text{sen } \theta_b} = \frac{n_a}{n_b}$$

Las dos primeras afirmaciones conforman la ley de reflexión, mientras que la tercera se denomina ley de refracción o de Snell.

La intensidad de los rayos reflejado y refractado depende del ángulo de incidencia, de los dos índices de refracción y de la polarización. Empleando las ecuaciones de Maxwell es posible pronosticar el valor de la amplitud, intensidad, fase y estado de polarización de las ondas reflejadas y refractadas. En cualquier caso, el porcentaje de energía reflejada depende del contraste existente entre los parámetros electromagnéticos de los diferentes materiales del medio. Este porcentaje nos define los coeficientes de transmisión y de reflexión de energía. Cuanto mayor sea la diferencia entre los parámetros electromagnéticos de los medios, mayor será el coeficiente de reflexión (Pérez Gracia, María de la Vega 2001).

El índice de refracción no solo depende de la sustancia sino también de la longitud de onda de la luz. Esta dependencia se denomina dispersión.

Mientras que los procesos de reflexión y refracción tienen lugar en la interfase entre materiales con distintas propiedades electromagnéticas, la atenuación se produce como consecuencia de la pérdida de energía de las ondas electromagnéticas al atravesar los materiales, siendo ésta mayor cuanto más grande sea la distancia recorrida por dichas ondas.

El coeficiente de atenuación o de absorción del material expresa la pérdida de energía que sufre la señal emitida al atravesar el medio por el que se transmite. La unidad de medida es el dB/m. Este coeficiente aumenta con el contenido en agua, la conductividad eléctrica, la



dispersión producida por una composición heterogénea, y el contenido de partículas metálicas (Ortiz and Crespo 2008).

Este valor cambia según la frecuencia, por lo que no se puede hablar de un coeficiente único. A continuación exponemos una tabla en la que se pueden apreciar cuales son los materiales que presentan mayor grado de atenuación:

MATERIAL	GRADO DE ATENUACIÓN	EJEMPLOS
Aire	Ninguno	Aire libre, patio interno
Madera	Bajo	Puerta, piso, medianera
Plástico	Bajo	Medianera
Vidrio	Bajo	Ventanas sin teñir
Vidrio teñido	Medio	Ventanas teñidas
Agua	Medio	Acuario, fuente
Seres vivos	Medio	Multitud, animales, personas, plantas
Ladrillos	Medio	Paredes
Yeso	Medio	Medianeras
Cerámica	Alto	Tejas
Papel	Alto	Bobinas de papel
Concreto	Alto	Muros de carga, pisos, columnas
Vidrio a prueba de balas	Alto	Ventanas a prueba de balas
Metal	Muy alto	Concreto reforzado, espejos, armarios metálicos, cabina del ascensor

Tabla 2. Grado de atenuación de algunos materiales.

## 4.2. Parámetros electromagnéticos de un medio.

El comportamiento de las ondas electromagnéticas al penetrar en el terreno depende de los siguientes parámetros: la conductividad eléctrica, la permitividad eléctrica, y la permeabilidad magnética (Pérez Gracia, María de la Vega 2001).

La conductividad eléctrica de un medio nos proporciona una medida de la capacidad de un material de conducir corriente eléctrica y se expresa numéricamente como la inversa de la resistividad. Su unidad en el sistema internacional es el *siemens/m*.

En general podemos distinguir entre materiales conductores (cuya conductividad es mayor de  $10^5 \text{ S/m}$ ), semiconductores y aislantes (valores de conductividad menores de  $10^8 \text{ S/m}$ ). En muchos medios sucede que el contenido de agua en los poros del material y la composición química de ésta determinan su conductividad más que los granos minerales que lo componen.

En la mayor parte de las rocas y subsuelos en los que se realizan estudios, la conductividad es principalmente electrolítica ya que, salvo en el caso de existencia de materiales metálicos, la mayor parte de los materiales habituales pueden considerarse aislantes. Si cambia la temperatura de los medios, esto afecta a la movilidad de los iones, y por tanto influye en la conductividad.

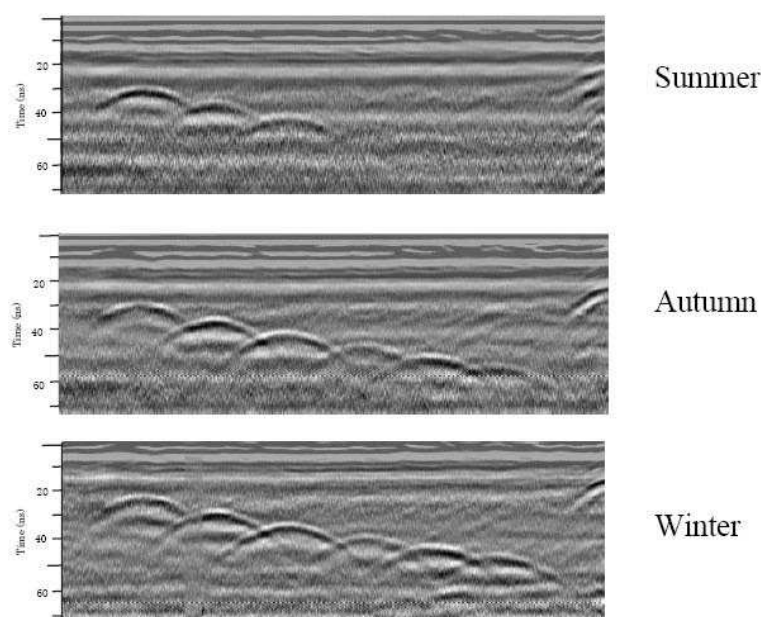


Figura 9. Radargramas correspondientes a tres líneas de medida realizadas en el mismo lugar pero en diferentes momentos del año. Se aprecia cómo según se esté en una estación u otra (donde la temperatura ambiente varía) la profundidad del georadar es diferente.

La permitividad o constante dieléctrica es una constante que da una medida de la capacidad de polarización de un material en presencia de un campo eléctrico. En la práctica esta constante depende de la conductividad eléctrica y del espesor del material atravesado siendo su valor en el vacío igual a uno. Para la mayoría de los materiales que podemos encontrar en el subsuelo al realizar una prospección electromagnética, los valores de la permitividad dieléctrica relativa se encontrarán entre 1 (la del aire) y 81 (la del agua a 20°C).

MATERIAL	PERMITIVIDAD DIELÉCTRICA	VELOCIDAD (cm/ns)
Aire	1	30
Agua dulce	81	3.3
Agua de mar	81	3.3
Nieve	1.4-3.0	19-25
Hielo	3.2	16.5
Arena seca	3-6	12-17
Arena saturada	25-30	5.5-6
Arcilla saturada	8-15	8.5-11
Suelo	16	7.5
Suelo arcilloso seco	3	17
Yeso	5.5	12.7
Yeso alterado	11.9	8.7
Tierra de labor	15	7.7
Granito	5-8	10.5-12
Caliza	7-9	10-11
Basalto	8	10.5

Pizarra	7	11
Arenisca saturada	6	11
Carbón	4-5	13.5-15

Tabla 3. Listado de los valores aproximados de la constante dieléctrica de las litologías más representativas.

Lógicamente estos son unos valores tabulados, ya para cada zona de estudio las características dieléctricas según la heterogeneidad de las litologías, por lo que será necesario realizar unos perfiles de calibración (como veremos más adelante en el apartado 5.1.2.1.)

La permeabilidad magnética es la capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través de sí los campos magnéticos. Esta capacidad viene dada por la relación entre la inducción magnética existente y la intensidad del campo magnético que aparece en el interior de dicho material. Se mide en *henri/m*.

Los materiales se pueden clasificar según su permeabilidad magnética relativa en:

- Ferromagnéticos: en estos, el valor de la permeabilidad magnética relativa es muy superior a uno. Estos materiales atraen el campo magnético hacia su interior; son los materiales que se “pegan” a los imanes. Un ejemplo de ellos son el hierro o el níquel.
- Paramagnéticos o no magnéticos: la permeabilidad relativa de estos es aproximadamente uno. Son la mayoría de materiales que encontramos en la naturaleza. No presentan ferromagnetismo y su reacción frente a los campos magnéticos es poco apreciable.
- Diamagnéticos: aquellos cuya permeabilidad relativa es inferior a uno, es decir, repelen el campo magnético, haciendo que éste pase por el exterior del material. Un ejemplo de estos materiales es el cobre.

En conclusión, si partimos de las ecuaciones de Maxwell y de la ecuación general de propagación de ondas se pueden obtener las relaciones que rigen la propagación de una onda electromagnética en función de las propiedades del medio en el que se produce. Es posible determinar la velocidad de propagación de la onda, la longitud de onda en el medio material y la atenuación que sufre la energía durante la trayectoria.

### 4.3. Termografía y rayos infrarrojos

Fue el astrónomo inglés William Herschel quien en 1800, descubrió los rayos infrarrojos; sucedió cuando investigaba con distintos materiales para la realización de filtros ópticos que permitiesen reducir el brillo de las observaciones solares. En estos experimentos constató que algunos colores emitían más calor que otros, por lo que decidió medir la temperatura de todos ellos, comprobando que el mayor valor lo obtenía cerca del rojo, en una zona donde no había luz visible (Astarita, *et al.* 2000).

Veinte años más tarde, sería el físico alemán Thomas Seebeck el que descubriera el efecto termoeléctrico que daría lugar a la invención en 1829 por parte de Leopoldo Nobili del “termomultiplicador”. La mejora en el diseño de este instrumento dio lugar a la aparición de la

termopila, que permitía detectar el calor corporal a una distancia de 9 metros. En 1880, el astrónomo americano Samuel Langley consiguió detectar el calor corporal de un animal a más de 300 metros de distancia. La primera imagen infrarroja la consiguió en 1840 el hijo de William Herschel, empleando un “evaporígrafo”.

En un principio, a lo largo del siglo XIX, se denominaron rayos calóricos, para después pasar a llamarse rayos infrarrojos, debido precisamente a su posición debajo del color rojo en el espectro electromagnético.

#### 4.3.1. Termodinámica básica

La termodinámica es la rama de la física que estudia la energía y la transformación entre sus distintas manifestaciones, como el calor y su capacidad para producir un trabajo. La 1ª ley de la termodinámica, también conocida como ley de la conservación de la energía, enuncia que cuando el trabajo mecánico se transforma en calor, o cuando el calor se transforma en trabajo, la cantidad de trabajo y calor son siempre iguales. Es decir, la energía ni se crea ni se destruye, solo se transforma. La 2ª de las leyes termodinámicas dice que cuando existe una diferencia de temperatura entre dos objetos, la energía térmica se transfiere de las zonas más calientes (las que mayor energía tienen) a las zonas más frías, hasta alcanzar un equilibrio térmico. Serán precisamente estas dos leyes las que nos rijan los principios y fundamentos de la termografía.

La materia está compuesta de átomos y moléculas en constante movimiento, originado éste por la energía: rotando alrededor de sí mismas, vibrando, o incluso chocándose. El movimiento y, en su caso el desplazamiento de los átomos y moléculas crea una forma de energía denominada energía térmica, presente en todo tipo de materia. Mientras el calor es la energía total en una sustancia o cuerpo, la temperatura es una medida de la energía térmica media. Será la termometría o metrología de la temperatura la que caracterice a la materia en función de su comportamiento térmico diferenciándose los comportamientos comunes de los anómalos (González Fernández 2006).

La transferencia de calor se puede definir como la ciencia cuyo objetivo es predecir la cesión de energía que se produce entre medios materiales como consecuencia de las diferencias de temperatura. Siempre que exista una diferencia de temperaturas en un cuerpo o entre cuerpos, debe ocurrir una transferencia de calor, proceso complejo que puede descomponerse en tres mecanismos: conducción, convección y radiación.

La conducción térmica se establece cuando se crea un gradiente térmico en un medio estacionario, que puede ser un sólido o un fluido, realizándose la transferencia de energía a través del mismo medio o entre diferentes medios. En la convección, la transferencia de energía se establece entre medios diferentes, y al menos uno de ellos está en movimiento. La radiación se produce debido a que todo cuerpo con temperatura distinta del cero absoluto (0 K o -273°C) emite energía en el espectro infrarrojo según una distribución que puede ser caracterizada por tres leyes físicas: la ley de Planck, la ley de Stefan-Boltzmann y la ley del desplazamiento de Wien.

La primera de ellas describe la distribución de la intensidad radiada desde un emisor perfecto en función de la temperatura de éste. En la segunda, aparece el concepto de la emisividad como una característica superficial del material que permite modelar la radiación total emitida

por un cuerpo a una temperatura, la integración a todas las longitudes de onda de la ley de Planck. La tercera ley recoge la evolución del pico de la energía en función de la temperatura obtenida a partir de la derivada de la función de Planck.

No todos los cuerpos emiten toda la radiación descrita por la ley de Planck sino que emiten una fracción de ésta. Esta fracción es la emisividad y, en general, varía con la longitud de onda, la forma del objeto, su temperatura, el ángulo de emisión de la radiación, las irregularidades de la superficie, factores ambientales... De esta forma se clasifican los materiales en cuerpos negros, cuerpos grises y cuerpos no grises según varíe o no la emisividad de una superficie.

Además, como consecuencia de la conservación de la energía, cuando una radiación es incidente a un cuerpo, parte de ésta es transmitida, parte absorbida y parte reflejada. Existe entonces una estrecha relación con otras propiedades de las superficies de los materiales: la transmisión, la absorción y la reflexión.

Las características del medio de transmisión existente entre el cuerpo bajo inspección y el instrumento de medida también afecta a las medidas de temperatura sin contacto. No existiría pérdida de energía si la medida se realizase en el vacío pero, incluso para distancias cortas, cualquier medio puede absorber energía y, por tanto, puede perturbar la medida. Así, el rango efectivo para los sistemas de medida termográficos está limitado por los fenómenos de absorción y dispersión de la radiación electromagnética en la atmósfera siendo dependiente de la distancia, condiciones ambientales, partículas en suspensión,...

#### 4.4. El láser

Los fundamentos para el desarrollo de láseres fueron establecidos en 1916 por Albert Einstein<sup>7</sup> cuando estudiaba el comportamiento de los electrones en el interior del átomo. Por lo general los electrones son capaces de absorber y emitir luz espontáneamente sin ninguna intervención externa. Einstein previó la posibilidad de estimular los electrones para que emitiesen luz de una longitud de onda determinada, siendo este estímulo una luz adicional de la misma longitud de onda.

Más adelante en 1928, Rudolf Landenburg afirmó haber obtenido la primera evidencia del fenómeno de emisión estimulada de radiación, pero la teoría fue olvidada hasta después de la Segunda Guerra Mundial.

En 1953, se construyó el primer máser, un dispositivo que funcionaba con los mismos principios físicos que el láser pero que producía un haz coherente de microondas. Sin embargo, en poco tiempo se vio que no tenía demasiadas aplicaciones. El primer láser que se fabricó era de rubí y funcionó por primera vez en 1960, dándose su primera aplicación industrial en 1969. Al año siguiente, en 1970, Gould patentó muchas otras aplicaciones del láser. A partir de la década de 1980, la tecnología láser experimenta una verdadera revolución pudiéndose aplicar en campos tan diferentes como pueden ser la medicina, la informática, la ingeniería, la arqueología, etc.

---

<sup>7</sup> Einstein descubrió la emisión estimulada pero para fabricar un láser se precisa también de amplificación de dicha emisión estimulada.

#### 4.4.1. Emisión estimulada y emisión espontánea

El láser es una fuente luminosa que produce un haz de luz altamente coherente –es decir, que se emite en un estrecho y poco divergente haz de longitud de onda bien definido- y aproximadamente monocromático, debido a una emisión de muchos átomos conjuntamente. El nombre de láser es el acrónimo de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, que significa amplificación de luz por emisión estimulada de radiación.

Si un átomo tiene un nivel excitado<sup>8</sup> con energía  $E$ , arriba del nivel fundamental, cuando está en su nivel fundamental puede absorber un fotón con la frecuencia  $f$  definida según  $E=hf$ . El proceso se muestra en la siguiente figura:

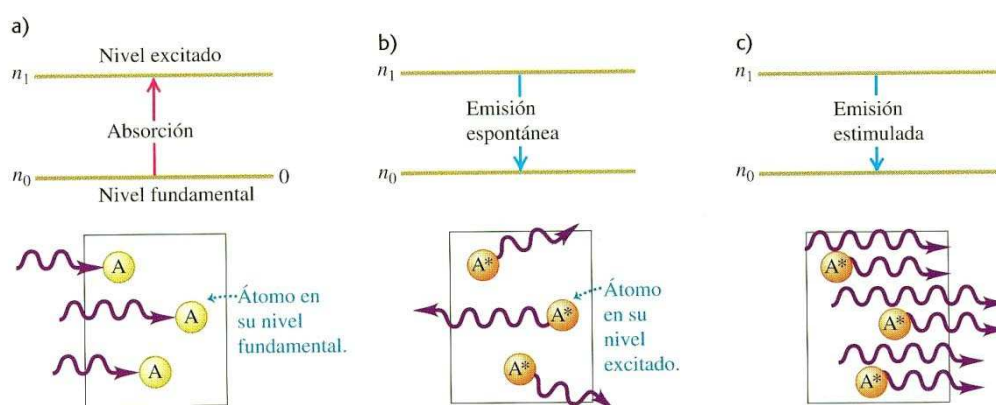


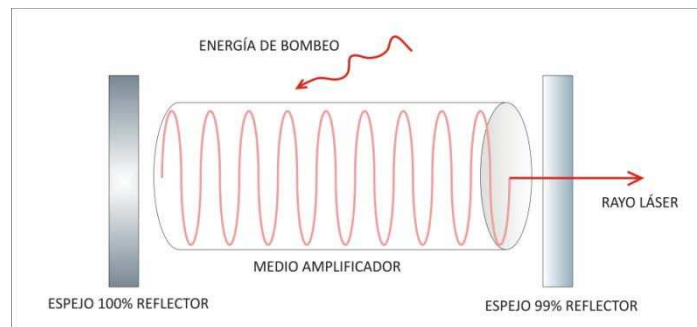
Figura 10. Tres procesos de interacción entre un átomo y las ondas electromagnéticas. Hay tres átomos (A) y cada uno absorbe un fotón pasando a un nivel excitado (A\*). Algún tiempo después, los átomos excitados regresan al nivel fundamental, emitiendo cada uno un fotón de la misma frecuencia que la que absorbieron inicialmente.

En el proceso de emisión espontánea (figura 10b) la dirección y fase de los fotones emitidos son aleatorias. En la emisión estimulada (figura 10c) cada fotón incidente se encuentra con un átomo excitado con anterioridad. Una suerte de resonancia induce a cada átomo a emitir un segundo fotón con la misma frecuencia, dirección, fase y polarización que el fotón incidente, el cual no cambia durante el proceso. Para cada átomo hay un fotón antes de una emisión estimulada y dos fotones después; de ahí el nombre de amplificación de luz. Como los dos fotones tienen la misma fase, emergen juntos en forma de radiación coherente. El láser usa la emisión estimulada para producir un haz formado por grandes cantidades de fotones coherentes.

La coherencia de la radiación, es decir, que la luz viaje en una misma dirección, se consigue mediante lo que se denomina cavidad resonante. Es un mecanismo formado por un espejo en cada extremo del medio amplificador, uno totalmente reflector y otro parcialmente reflector, que permite que parte de la luz salga al exterior después de repetidas reflexiones dentro del medio amplificador. Estas reflexiones por un lado, hacen que disminuya la divergencia del haz y

<sup>8</sup> Cada átomo tiene un nivel mínimo de energía que incluye al estado de energía interna mínima que puede tener el átomo y al que se le denomina nivel de estado fundamental o nivel fundamental. Todos los niveles más altos se llaman niveles excitados.

sea cada vez más paralelo al eje de la cavidad y por otro lado, permiten una mayor amplificación del haz de luz al pasar repetidamente por el medio.



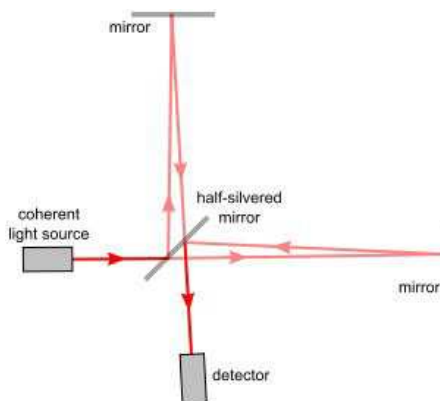
*Figura 11. Esquema de un láser.*

#### 4.4.2. Interferometría

La interferometría es una técnica –normalmente utilizada en astronomía– que consiste en combinar la luz proveniente de diferentes receptores, telescopios o antenas para obtener una imagen de mayor resolución. Su implementación con longitudes de onda muy pequeñas resulta bastante compleja debido fundamentalmente a la mayor precisión mecánica requerida al manipular dichas longitudes de onda.

El principio físico utilizado es que dos ondas de luz que coinciden en fase se amplifican mientras que dos ondas en oposición de fase se cancelan, permitiéndose cualquier combinación intermedia.

La medición interferométrica de distancias puede ser de muy alta precisión, incluso superior a otros sistemas de medición empleados en los escáneres láser, funcionando perfectamente en entornos con atmósfera controlada, en distancias no superiores a decenas de metros.



*Figura 12. Interferómetro de Michelson.*

En un láser escáner interferométrico, el haz se divide usando un prisma que refleja la mitad del haz en una dirección (brazo de referencia) y transmite la otra mitad (brazo de medición). Ambas partes del haz viajan por diferentes caminos y cuando se combinan se producen interferencias. Pueden detectarse desplazamientos muy pequeños –empleando la detección coherente– y se pueden medir grandes distancias con relativamente baja ambigüedad.



#### 4.4.3. Propiedades de la luz láser

La luz láser es luz generada mediante un instrumento láser y presenta unas propiedades particulares que la distinguen de la luz proveniente de otras fuentes (Lerma García and Biosca Tarongers 2008). A continuación enumeramos las principales.

- a) La luz láser se genera en forma de haz láser, teniendo este haz un alto grado de coherencia espacial, es decir, se propaga en una dirección bien definida de forma moderadamente divergente. Esta coherencia permite que un haz láser se pueda propagar a lo largo de largas distancias y se focalice produciendo manchas de luz de dimensiones reducidas.
- b) El haz láser tiene una alta coherencia temporal, lo que implica una rígida relación de fase a través de intervalos de tiempo relativamente largos, correspondientes a largas distancias de propagación.
- c) Se obtiene un ancho de banda espectral estrecho. Esto significa que los haces de láser visible tienen un cierto color puro, por ejemplo, verde, rojo o azul pero nunca blanco o magenta.
- d) En la mayoría de los casos la luz láser está polarizada linealmente, es decir, el campo eléctrico oscila en una dirección particular.
- e) La luz láser puede ser visible pero la mayoría de los láseres emiten en otras regiones del espectro, particularmente en el infrarrojo cercano que el ojo humano no puede percibir.
- f) La luz láser no siempre es continua, pero puede ser emitida en forma de pulsos cortos o ultra cortos. Como consecuencia de esto los máximos de potencia pueden ser extremadamente altos.

Desde la invención del láser en 1958, éste se ha utilizado en muchas y muy diversas aplicaciones. Su coherencia, alta monocromaticidad, y su capacidad de alcanzar potencias extremas permiten utilizarlo en aplicaciones especializadas. Por tanto, es fundamental el manejo de esta luz con extrema precaución.

Todos los láseres vienen debidamente etiquetados y clasificados dependiendo de la longitud de onda y de la energía que producen. En el estándar europeo IEC 60825-1<sup>9</sup> Se describen 7 clases de láser:

- Clase 1: son seguros en condiciones de utilización razonablemente previsibles incluyendo el uso de instrumentos ópticos.
- Clase 1M: son seguros en condiciones de utilización razonablemente previsibles, pero pueden ser peligrosos si se emplean lentes con el haz.
- Clase 2: producen normalmente un reflejo ciego para proteger al ojo. Son seguros en condiciones de utilización razonablemente previsibles incluyendo el uso de instrumentos ópticos.

---

<sup>9</sup> <http://www.iec.ch/index.htm>



- Clase 2M: producen normalmente un reflejo ciego para proteger al ojo. Son seguros en condiciones de utilización razonablemente previsibles, pero pueden ser peligrosos si se emplean lentes con el haz.
- Clase 3R: potencialmente peligrosos cuando se produce visión directa del haz, aunque con menor riesgo que con los 3B.
- Clase 3B: potencialmente peligrosos cuando se produce visión directa del haz aunque la visión de reflexiones difusas es normalmente segura. Esta clase de láser no es adecuada para aplicaciones de campo.
- Clase 4: si se observan directamente causan daños en los ojos o en la piel, pudiendo producir reflexiones peligrosas. Esta clase de láser no es adecuada para aplicaciones de campo.

## 4.5. Los rayos X y la tomografía

Hace algo más de un siglo, en 1895, Wilhelm Conrad Röntgen, científico alemán de la Universidad de Würzburg, recibió el premio Nobel de Física por descubrir de forma casual una radiación –hasta entonces desconocida y de ahí su nombre<sup>10</sup>– que llamó rayos X. Esta radiación tenía la propiedad de penetrar en los cuerpos opacos.

Los rayos X tienen muchas aplicaciones, fundamentalmente en medicina e industria. Debido a la alta energía de los fotones de rayos X, estos son capaces de penetrar varios centímetros en la materia sólida, por lo que se pueden emplear para visualizar los interiores de materiales que son opacos a la luz ordinaria (Young and Freedman 2009).

Los rayos X son radiaciones electromagnéticas cuya longitud de onda va desde unos 10 nm hasta 0,001 nm. Cuanto menor es la longitud de onda de los rayos X, mayores son su energía y poder de penetración. Los rayos de mayor longitud de onda, cercanos a la banda ultravioleta del espectro electromagnético, se conocen como rayos X blandos; los de menor longitud de onda, que están más próximos a la zona de rayos gamma, se denominan rayos X duros. Los rayos X formados por una mezcla de muchas longitudes de onda diferentes se conocen como rayos X ‘blancos’, para diferenciarlos de los rayos X monocromáticos, que tienen una única longitud de onda. Tanto la luz visible como los rayos X se producen a raíz de las transiciones de los electrones atómicos de una órbita a otra. La luz visible corresponde a transiciones de electrones externos y los rayos X a transiciones de electrones internos.

Cuando se quiere sacar una radiografía, el objeto a visualizar se coloca entre una fuente de rayos X y una hoja grande de película fotográfica. El oscurecimiento de la película es proporcional a la exposición a la radiación. Una grieta o una burbuja de aire permiten mayor transmisión y se manifiestan como una zona oscura.

Una técnica de rayos X empleada con frecuencia, que ha mejorado notablemente, es la tomografía computarizada. La fuente de rayos X produce un haz delgado, en forma de abanico, que detecta el lado opuesto del objeto mediante una serie de varios cientos de detectores alineados. Cada detector mide la absorción a lo largo de una línea delgada que

---

10 Posteriormente, los rayos X fueron también denominados rayos Roentgen en su honor.

atraviesa el objeto. Todo el aparato gira en torno al elemento, en el plano del haz, durante algunos segundos. Se registra digitalmente la información obtenida y posteriormente se forma una imagen de absorción por secciones.

## 4.6 Las ondas acústicas

La acústica es una rama de la física que estudia el sonido, infrasonido y ultrasonido, es decir ondas mecánicas que se propagan a través de la materia -tanto sólida como líquida o gaseosa, ya que no se propagan en el vacío- por medio de modelos físicos y matemáticos. A efectos prácticos, la acústica estudia la producción, transmisión, almacenamiento, percepción o reproducción del sonido.

Generalmente, en los ensayos no destructivos se trabaja con ultrasonidos, es decir, ondas acústicas o sonoras cuya frecuencia está por encima del espectro audible del oído humano.

Para poder generar ultrasonidos, es necesario disponer de un generador o transductor, que estará constituido por un elemento primario o transformador (que es el que está en contacto con el medio y que transforma la señal eléctrica, magnética o mecánica en una onda ultrasónica) y el elemento secundario que será el que genere la señal. Las ondas producidas harán vibrar el medio (Vega Fidalgo and Zorita Téllez).

La transmisión de estas ondas dependerá en gran medida del medio ya que cada uno tiene una impedancia distinta, lo que hace variar la velocidad de propagación. Los medios con impedancias muy diferentes provocan grandes reflexiones. Además es fundamental evitar el aire en la transmisión ya que este gas podría anular la propagación de la onda ultrasónica.

Las ondas de dilatación o longitudinales (también denominadas primarias, P) hacen variar el volumen del material a través del cual se propagan y la vibración de las partículas se hace en dirección paralela al avance de la onda. Las de distorsión o transversales no provocan variación en el volumen aunque los límites del medio pueden alterarse. Éstas pueden denominarse también secundarias (S), y en ellas la vibración de las partículas se realiza en dirección perpendicular a la propagación de la onda. Existe una combinación de ambas que son las ondas de superficie, y que simplemente son ondas que viajan a una distancia muy pequeña de la superficie del medio (Lombillo and Villegas 2008).

Al tratarse de ondas, tienen lugar fenómenos típicos de las ondas como son la reflexión, la refracción o la difracción ya explicadas en el apartado 4.1.4. La longitud de onda que estamos utilizando es muy pequeña lo que influye notoriamente en la difracción. En general, este tipo de ondas pueden considerarse como planas, con propagación rectilínea debido al pequeño valor de su longitud de onda; la energía, por tanto, no puede desplazarse a través de discontinuidades (esta propiedad se suele utilizar para localizar pequeños objetos).

## 5. CARACTERÍSTICAS DE LAS PRINCIPALES TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS

### 5.1 Georadar

El georadar es una técnica geofísica que empezó a generalizarse durante la década de los años 1930 (al principio solo para estimar el espesor de hielo en los glaciares), pero que cobró un verdadero auge en los años 70, teniendo múltiples campos de actuación, equipos y técnicas. Con todo, es en los últimos años del siglo XX cuando tiene su mayor despegue, creándose incluso un congreso bianual dedicado al tema, el *International Conference On Ground Penetrating Radar*<sup>11</sup>.

Entre las aplicaciones más frecuentes del georadar se encuentran el medio ambiente, la geología, los riesgos geológicos, la geotecnia o la arqueología, siendo una de las primeras aplicaciones en este último campo la llevada a cabo por Vickers y su equipo en 1976 en un yacimiento de Nuevo México (Pérez Gracia, María de la Vega 2001).

En el campo concreto de la arqueología y el patrimonio es cada vez más notoria su presencia, con una gran variedad de aplicaciones, debido en gran parte a que se trata de un método no destructivo, fácil de utilizar en campo y cuyos resultados permiten a los investigadores detectar posibles zonas de interés, acotando el límite de posteriores trabajos.

Existe otra rama de la investigación sobre georadar consistente en realizar ensayos en laboratorio. En estas pruebas se trabaja con diferentes materiales y mezclas para definir sus propiedades y especificar el comportamiento de las ondas. En este sentido, no debemos olvidar los proyectos dirigidos al desarrollo de algoritmos y modelos matemáticos que expliquen el fenómeno, diseño de software, estudios de simulación, etc.

Algunas de las ventajas de este método respecto a otros son (Ortiz and Crespo 2008):

- a) Se trata de un método no destructivo.
- b) Posibilidad de realizar medidas continuas en el espacio.
- c) Rapidez tanto en la toma de datos en campo como en su interpretación.
- d) Versatilidad del equipo para un gran número de trabajos.
- e) Ausencia de impactos ambientales.
- f) Mínima interferencia con los trabajos habituales desarrollados en la zona.
- g) Mínimo impacto, fundamentalmente en zonas de especial protección.

Entre sus principales inconvenientes está su alta dependencia de la profundidad de prospección, del contenido en agua y de las litologías existentes. Asimismo, aunque el proceso de toma de datos es relativamente sencillo, las interpretaciones de los registros no son tan evidentes.

Tal y como hemos comentado en el epígrafe dedicado a las técnicas no destructivas, la utilización del georadar no impide su uso con otros métodos, siendo en unos casos un complemento y en otros una comprobación de los resultados.

---

<sup>11</sup> <http://www.ibam.cnr.it>

### 5.1.1. Fundamentos del georadar

El georadar (GPR *Ground Penetrating Radar*) es un sistema electromagnético que proporciona información sobre la estratigrafía del terreno en los primeros metros de profundidad basándose en la respuesta de los materiales del subsuelo a cortos pulsos de energía electromagnética de alta frecuencia (Gómez López 2008).

El georadar actúa por medio de una antena transmisora –normalmente denominada Tx– situada muy próxima al suelo, que emite pulsos electromagnéticos de corta duración. El pulso radiado penetra en tierra, de donde es parcialmente reflejado a la superficie cada vez que interacciona con un objeto, (estructura o cambio en la estratigrafía del terreno) que presenta propiedades electromagnéticas diferentes a las del medio que le rodea. La señal reflejada es recibida por una antena receptora –denominada Rx– de las mismas características que la emisora, que registra el tiempo transcurrido desde que las ondas salieron de la antena emisora hasta que llegaron a ésta, así como la intensidad de la señal recibida tras atravesar los materiales del subsuelo. Durante su recorrido, la onda no solo sufre el fenómeno de la reflexión; una parte se refracta, y otra parte se atenúa (figura 5) como consecuencia de la pérdida de energía de las ondas electromagnéticas al atravesar los materiales, (siendo ésta mayor cuanto mayor sea la distancia recorrida por la onda).

Una vez captada, la señal recibida se amplifica, digitaliza y almacena para después mediante el post proceso adecuado, obtener información de las características, contenido y posibles anomalías del subsuelo (profundidad, orientación, tamaño y forma de los objetos enterrados) (Gómez López 2008).

La eficacia de esta técnica depende en gran medida de si las superficies de interés tienen suficiente contraste dieléctrico como para producir reflexiones. La profundidad de penetración y la resolución de los datos están en función de la longitud de onda y de la constante dieléctrica, parámetros controlados por el contenido en agua de los distintos materiales (Ortiz and Crespo 2008).

La propagación de la señal emitida depende de las propiedades del subsuelo: conductividad, permitividad eléctrica y permeabilidad magnética (apartado 4.2.). La conductividad eléctrica de suelos y rocas y la trayectoria que recorren las ondas, limitan la profundidad a la que estas ondas podrán viajar. La capacidad de penetración es exclusiva de cada lugar de trabajo ya que las propiedades magnéticas no son iguales en todas las partes de la Tierra. (En las tablas 2 y 3 se pueden consultar valores promediados de atenuación y de constantes dieléctricas de algunos de los materiales más comunes).

Normalmente las antenas se sitúan directamente sobre la superficie del suelo (o tan cerca como sea posible) ya que si se colocan lejos, el acoplamiento entre antenas y suelo disminuye, y parte de la energía radiada se refleja hacia la antena receptora disminuyendo la energía que penetra en el suelo.

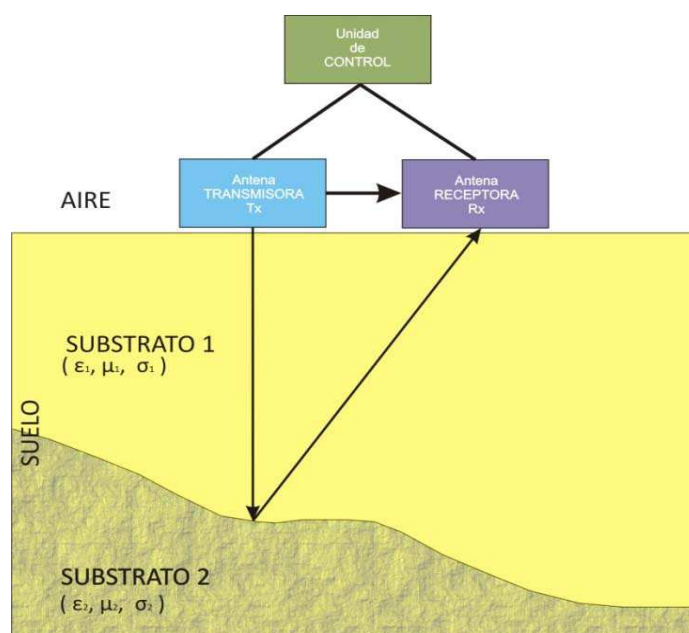


Figura 13. Esquema de funcionamiento de un equipo de georadar y sus componentes fundamentales.

### 5.1.2. Instrumentación

Las antenas son la parte fundamental en un equipo radar, ya que son los elementos encargados de emitir y recoger el pulso electromagnético<sup>12</sup>.

Así, si atendemos a la señal emitida hablaremos de georadar de impulso –cuando la onda radiada es un pulso de 1-10 ns de duración–, o de georadar de frecuencia modulada continua. Los primeros son los más utilizados.

Los equipos radar podrán tener 1, 2 o más antenas siendo la mayoría de los equipos comerciales biestáticos, lo que significa que están compuestos por una antena emisora y otra antena receptora. Cuando la misma antena hace las funciones de emisora y de receptora nos encontramos ante equipos monostáticos (Gómez López 2008). En este caso una vez emitido el pulso la antena cambia al modo de recepción a la espera de la señal reflejada. Esto en los radares no debe presentar mayor inconveniente, pero sí en los georadares donde la cercanía al suelo hace que la señal llegue prácticamente de forma instantánea y se necesite un elemento que permita compartir la antena para ambas funciones. Sin embargo, tienen la ventaja de que la toma de perfiles se puede realizar de forma fácil y rápida. Existen otro tipo de georadares que presentan mayor número de antenas, pero su uso no es muy habitual en arqueología dada la complejidad del procesado de los datos, así como su elevado precio y voluminosidad. Sin embargo, podemos encontrar un ejemplo de estos equipos aplicados a las prospecciones arqueológicas en (Francese, *et al.* 2009) y en (Trinks, *et al.* 2010), resultando especialmente útiles cuando la superficie a prospectar es muy extensa.

Existe otra clasificación de las antenas en función del campo radiado, distinguiéndose en este caso entre antenas isotrópicas –aquellas que radian la energía en todas las direcciones por

<sup>12</sup> En (Rodríguez Abad 2009) podemos encontrar una completa descripción de los distintos tipos de antenas.

igual, y antenas direccionales, cuando la emisión que producen no es homogénea en todas las direcciones, es decir, cuando tienen una dirección privilegiada de radiación. El modelo de radiación de las antenas depende de las características electromagnéticas de los medios en contacto; conforme aumenta la permitividad dieléctrica efectiva de un medio, la direccionalidad de la antena también aumenta. Esto conlleva una anchura del lóbulo de radiación menor, de forma que el mayor porcentaje de energía se propaga en la dirección deseada y el resto se dispersa por el medio exterior.

La frecuencia de emisión de las antenas da lugar a una cuarta clasificación. La longitud de onda ( $\lambda$ ) del pulso emitido dependerá de la frecuencia ( $f$ ) y de la velocidad de la onda en el medio ( $v$ ) según la ecuación  $\lambda=v/f$ .

Las antenas habrán de elegirse con unas características concretas en función a las aplicaciones concretas a las que se quiera destinar el radar. Así, antenas de baja frecuencia (<100 Mhz) tienen una gran capacidad de penetración (>9 metros), pero una escasa resolución<sup>13</sup>. Por su parte, las antenas de alta resolución profundizan muy poco en el terreno, si bien permiten distinguir objetos de muy pequeño tamaño.

FRECUENCIA	LONGITUD DE ONDA	DENOMINACIÓN
<3 KhZ	>100 km	Frecuencia extremadamente baja
3-30 KhZ	100-10 km	Muy baja frecuencia
30-300 KhZ	10-1 km	Baja frecuencia
0.3-3 MHz	1000-100 m	Frecuencia media
3-30 MHz	100-10 m	Alta frecuencia
30-300 MHz	10-1 m	Muy alta frecuencia
0.3-3 GHz	100-10 cm	Ultra-alta frecuencia
3-30 GHz	10-1 cm	Super-alta frecuencia
30-300 GHz	10-1 mm	Extremadamente alta frecuencia

Tabla 4. Bandas de frecuencia y longitudes de onda correspondientes a cada banda para la propagación en el vacío.

Las antenas de baja frecuencia normalmente suelen ser más grandes, pesadas y difíciles de manejar que las de alta frecuencia, de hecho en ocasiones requieren de un vehículo que mueva el equipo. Las antenas de baja frecuencia por su parte suelen estar apantalladas y protegidas.

Este último tipo de antena suele presentarse embutida en una carcasa de fibra de vidrio o plástico que se sitúa directamente sobre el suelo o muy cerca. El apantallamiento permite a los pulsos propagarse hacia el interior de la tierra pero no hacia afuera ni hacia los lados. A veces el apantallamiento no es perfecto y hay algunas reflexiones no deseadas que quedan registradas. Si éstas son debidas a un error sistemático, por ejemplo la presencia del operador siempre a un lado del georadar, es posible detectarlas en la fase de laboratorio y eliminarlas, pero si las reflexiones se deben a fenómenos aleatorios, es muy difícil discriminarlas y eliminarlas.

<sup>13</sup> El tamaño mínimo de los objetos a identificar será grande.

El apantallamiento es muy importante cuando se trabaja en áreas cerradas, zonas urbanas etc. donde la presencia de elementos perturbadores pueden ensombrecer el resultado de la prospección (Novo, *et al.* 2009).

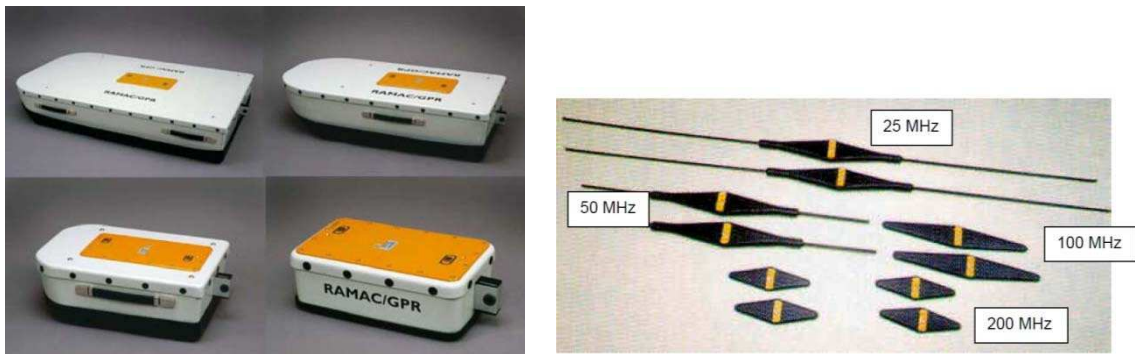


Figura 14. Antenas apantalladas (figura izquierda) y no apantalladas (derecha).

La unidad central o unidad de control es la que se encarga de coordinar las antenas, y los diversos accesorios que pudiera llevar el equipo. Almacena la señal en algún tipo de soporte y lleva implementado un software para ir visionando durante la toma de datos en campo los registros que se adquieren.

A los elementos básicos, se les pueden añadir ciertos accesorios que faciliten la tarea de adquisición de datos, bien en la visualización o a la hora de georeferenciar los perfiles. Como veremos más adelante, la ubicación exacta de los puntos medidos es fundamental para poder hacer posteriormente una buena interpretación; por ello, los georadares suelen acompañarse de odómetros, sistemas GPS o prismas de reflexión óptica si es que se trabaja con métodos topográficos clásicos.



Figura 15. Sistema georadar modular empleado en la prospección de un yacimiento arqueológico en Suiza. En este caso el equipo está formado por 17 antenas (8 receptoras y 9 transmisoras -figura c). EL equipo se completa con un multiprisma acoplado en la parte izquierda del georadar (según la dirección de barrido-figura a). Adicionalmente se ha incorporado un odómetro calibrado a una de las ruedas que proporciona datos exactos sobre la distancia recorrida.



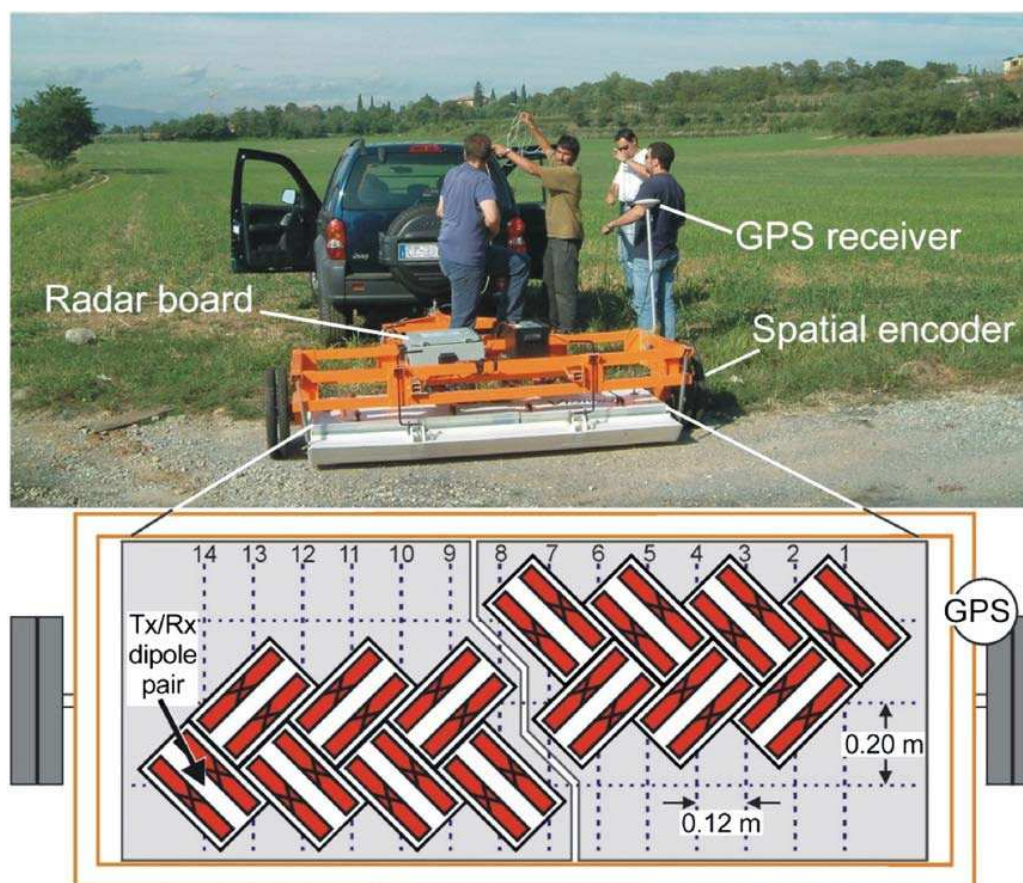


Figura 16. Equipo georadar multicanal de alta resolución 3D empleado en la prospección de una villa romana al norte de Italia. El sistema está compuesto por 14 dipolos emisores-receptores alineados en tres filas (4-6-4), cuyos ejes están rotados un ángulo de 45° respecto a la dirección de barrido. El equipo va acompañado de un receptor GPS trabajando en modo RTK que les sirve de guía a la hora de acometer los perfiles y al mismo tiempo les proporciona la posición de manera inmediata y absoluta.

#### 5.1.2.1. Calibración de equipos

Antes de comenzar la recogida de datos en campo, es necesario calibrar el instrumento específicamente para la litología de la zona sobre la que se va a trabajar, proceso imprescindible para asegurar la fiabilidad de las medidas, así como para obtener profundidades reales. Para transformar la escala de tiempos en una escala de profundidad es necesario conocer la velocidad de transmisión de las ondas electromagnéticas. En la tabla 3 se pueden consultar los valores de permitividad eléctrica y velocidad de algunos materiales.

Debido a la heterogeneidad de las distintas litologías, los valores que aparecen en esas tablas son solo valores medios, siendo necesario realizar una serie de perfiles de calibración en nuestra zona de estudio. Una forma de obtener estos datos es situando el equipo en una zona donde se tenga conocimiento de la profundidad a la que se encuentra una anomalía y aplicando la siguiente expresión:

$\epsilon_r = \left( \frac{t_s c}{2d} \right)^2$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío,  $t$  es el tiempo en segundos y  $d$  es el espesor de material recorrido por la onda en metros.



Para realizar esta calibración, una manera sencilla de proceder es utilizar un objeto metálico y situarlo a una profundidad conocida. Las reflexiones que produzca esta pieza serán fácilmente detectables por lo que resultará más o menos sencillo calcular la constante dieléctrica.

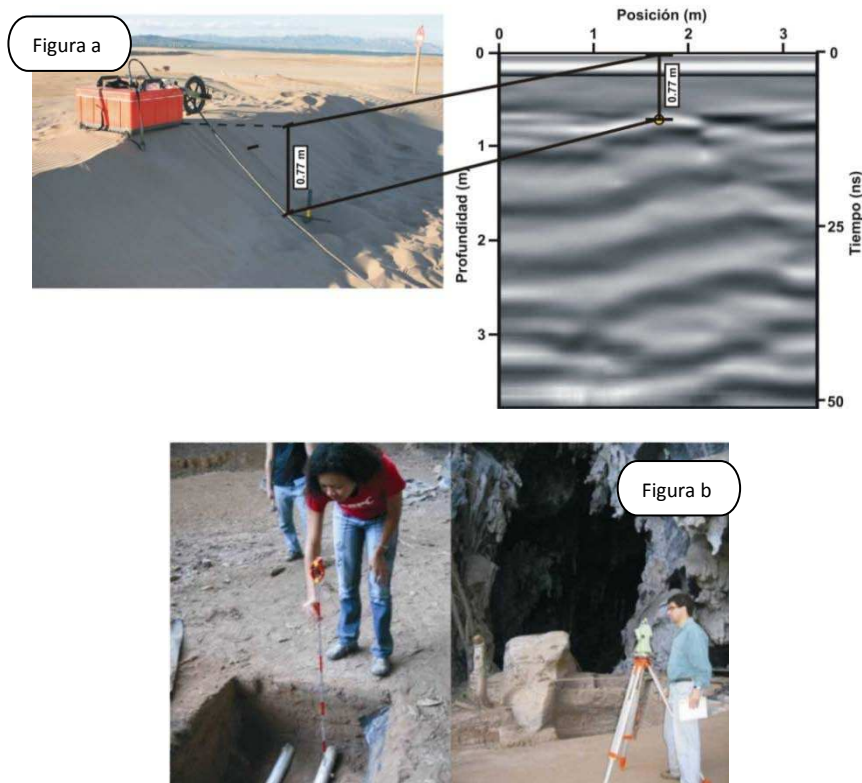


Figura 17. La figura a representa el procedimiento de calibración del radargrama obtenido, en el que se aprecia la reflexión de una barra metálica. Posteriormente (figura b) mediante topografía clásica y con una estación total se determina de manera precisa la profundidad a la que se encuentra dicho objeto de tal manera que se pueda calcular de una manera sencilla y precisa la constante dieléctrica de la zona prospectada.

Otra forma de calibrar el equipo es mediante el denominado método del punto reflector común (*Common Mid Point CMP*). Esta prueba se realiza con antenas biestáticas desplazando la emisora y la receptora en direcciones opuestas respecto a un punto central entre ambas.

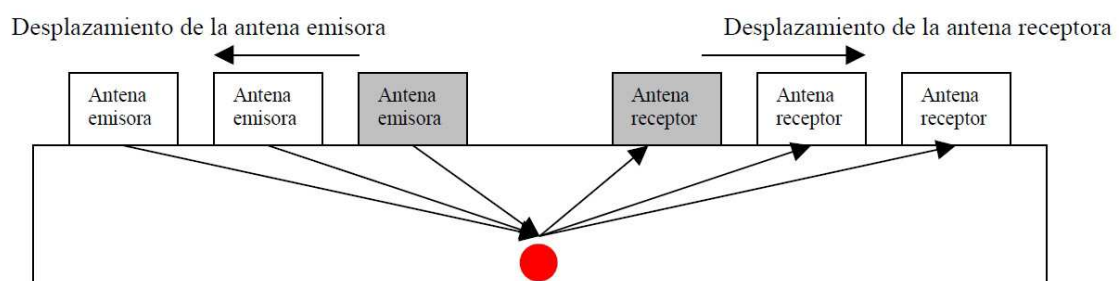


Figura 18. Obtención de datos mediante el método del punto de reflexión común.

Las dos antenas deben quedar siempre equidistantes con respecto a dicho punto; al realizarse la adquisición de datos se obtiene un registro que, representado en una gráfica distancia-

tiempo, tiene forma de hipérbola, una para cada reflector que haya bajo las antenas. A partir de los datos conocidos de distancia entre antenas y los tiempos de propagación, es posible obtener los parámetros del medio, es decir, velocidad efectiva de propagación y profundidad del reflector.

Para el trabajo realizado por (Martín Gutiérrez 2004) se creó específicamente un campo de pruebas en el que se enterraron objetos a una determinada profundidad cubiertos por material conocido, de tal forma que podían controlar el funcionamiento del equipo georadar analizando la precisión de los resultados que se pudieran llegar a obtener.

### 5.1.3. Métodos de adquisición de datos

#### 5.1.3.1. Consideraciones previas

Antes de acometer un proyecto con georadar, es importante conseguir la mayor información posible sobre el objeto de estudio, de tal forma que la elección del equipo así como la metodología a seguir sea la óptima. Entre estos datos interesa conocer, al menos aproximadamente, la profundidad a la que se pretende llegar con la prospección, el tamaño que tendrán los objetos que se detecten en los radargramas, las propiedades electromagnéticas del suelo en la zona de trabajo, la orografía de la región, etc. Para conseguir esta información se acudirá a mapas geológicos, a estudios previos (geofísicos o arqueológicos) que nos puedan indicar la potencialidad de los estratos, cartografía existente, etc.

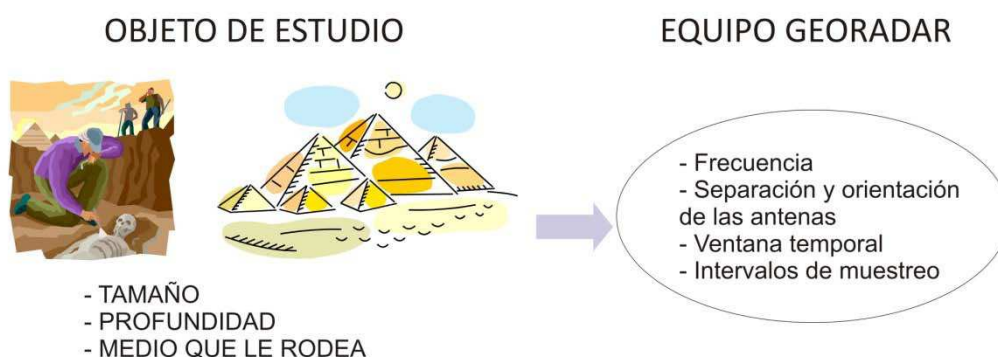


Figura 19. Aspectos que hay que considerar antes de comenzar cualquier proyecto. En función del elemento que se quiera estudiar, la elección del equipo de medida variará.

Como hemos comentado en el epígrafe anterior, la antena es la parte fundamental del equipo de prospección por lo que habrá que prestar especial atención a su elección ya que en ocasiones de ello depende que los resultados estén a la altura de lo esperado.

Así, las características que ha de presentar la antena elegida serán (Gómez López 2008):

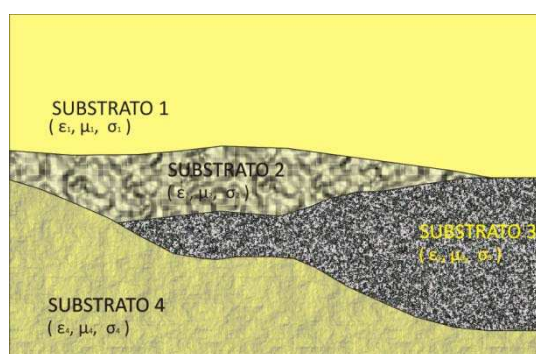
- ✓ Parámetros constantes en toda la banda de operación.
- ✓ Acoplamiento bajo y de corta duración entre las antenas Tx y Rx.
- ✓ Antenas directivas con energía radiada hacia tierra.
- ✓ Comportamiento no afectado por las características del subsuelo.

- ✓ Forma y tamaño de la huella comparable a la del objeto que se quiere detectar.
- ✓ Antenas robustas y ligeras.

Una vez elegido el equipo de trabajo, para llevar a cabo las medidas necesarias con el georadar es necesario seleccionar previamente una serie de parámetros que garanticen el éxito de la prospección; estos están directamente relacionados con la antena elegida<sup>14</sup>. Se trata de:

a. La ventana temporal o ventana de tiempos dobles.

Se denomina ventana temporal (TW) al tiempo -medido en nanosegundos ( $10^{-9}$  segundos)- que transcurre desde que la antena transmisora envía el pulso electromagnético hasta que la antena receptora recoge la señal con todas las reflexiones que se han producido en el subsuelo. El valor de esta ventana normalmente es configurable por el usuario, que si conoce la velocidad del material ( $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$ ), así como la profundidad aproximada a la que se encuentra el blanco, es fácilmente calculable. Debido a lo heterogéneo del subsuelo, los valores de la constante dieléctrica relativa del material ( $\epsilon_r$ ) siempre serán valores aproximados e influirán en el cálculo de la velocidad del material, a no ser que se haya calibrado el equipo tal y como se explicaba en la sección 5.1.2.1. El subsuelo podrá estar formado por distintas litologías lo que implica que a lo largo de un pulso existan varios cambios de velocidad.



*Figura 20. Litologías que forman el subsuelo.*

Se recomienda ampliar el tiempo de apertura de la ventana en un 30% para evitar que haya reflexiones que no queden reflejadas (Gómez López 2008) pudiéndose calcular según la fórmula<sup>15</sup>:  $TW = 1.3 \frac{2D_{max}}{v}$ , donde  $v$  es la velocidad de las ondas electromagnéticas en el subsuelo, y  $D_{max}$  es la profundidad máxima donde se estima pueden encontrarse los objetivos.

Debido a la atenuación, llega un punto en el que la energía de las ondas electromagnéticas disminuye tanto que no son capaces de llegar a la superficie, por lo que por mucho que se aumente la ventana temporal lo único que se registra es ruido ambiental.

<sup>14</sup> Los tres primeros – ventana temporal, resolución temporal y resolución espacial-son comunes a todos los equipos de georadar independientemente de la antena elegida.

<sup>15</sup> En la fórmula la cifra 1.3 hace mención al 30% de tiempo añadido que se recomienda poner en la ventana temporal y el 2 que acompaña a la distancia máxima, se debe al camino de ida y vuelta que tiene que hacer el pulso.

b. La resolución espacial

La resolución espacial representa el espaciado horizontal de los datos. Se trata de definir el intervalo espacial en el que se van a tomar medidas a lo largo de los perfiles realizados y está directamente relacionado con el modo de adquisición<sup>16</sup>. En el caso de optar por el método continuo sin odómetro, habrá que transformar posteriormente las medidas por unidad de tiempo en medidas por unidad de longitud para así poder definir la resolución espacial. En caso de trabajar en modo continuo con odómetro o con el método de punto a punto, dicha resolución la establece directamente el operador, adecuándose siempre al objetivo prospectado.

Lógicamente cuanto más pequeño sea el intervalo entre medidas, mayor será el número de trazas recibidas por unidad de distancia con el correspondiente aumento de cobertura del subsuelo.

c. La resolución temporal

Se trata de definir el número de mediciones a realizar para la ventana temporal definida anteriormente. Es el equivalente a la resolución vertical, condicionada por la frecuencia de la antena utilizada.

d. La representación de las medidas

A la hora de registrar las medidas, hay dos modos de representarlas: como trazas, es decir, mediante una curva que une los valores de amplitud de la señal recibida en cada punto, o bien empleando escalas de color, teniendo cada rango de amplitud de la señal recibida un color determinado.

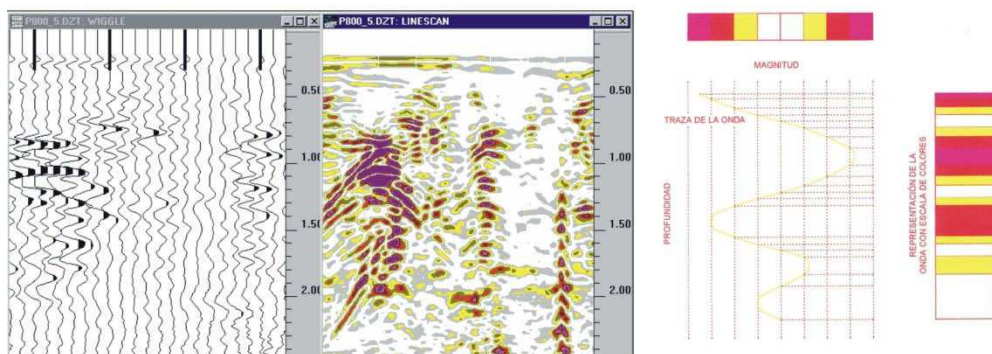


Figura 21. Representación de los datos mediante trazas o mediante escalas de color.

e. El pulso

La selección de las características del pulso electromagnético emitido por la antena transmisora Tx, depende de las propiedades del subsuelo, así como la profundidad, geometría y características electromagnéticas de los objetos que se pretenden detectar. En general, las pérdidas de energía de una onda electromagnética aumentan con la frecuencia, por tanto los pulsos con componentes de frecuencia menor - longitudes de onda mayores- penetran más profundamente en la tierra que los pulsos con mayores frecuencias y menores longitudes de onda. Por el contrario, los pulsos que poseen componentes espectrales de mayor frecuencia permiten una mayor resolución y como consecuencia permiten detectar objetos más pequeños.

f. La frecuencia de muestreo

<sup>16</sup> Los modos de proceder con el georadar se explican en el apartado siguiente.

Cada señal o traza debe ser muestreada siendo este intervalo de muestreo como mínimo la mitad del periodo correspondiente a la componente espectral de máxima frecuencia del pulso radiado.

g. La sensibilidad y resolución de la antena

La sensibilidad se define como la capacidad de detectar pequeños objetos y es función de la longitud de onda ( $\lambda$ ) de tal forma que los objetos más pequeños de  $\lambda/2$  no reflejan energía hacia el receptor –por tanto no se pueden detectar–, mientras que la resolución es la capacidad de distinguir entre dos objetos muy próximos.

h. La orientación y separación de las antenas

Una forma de calcular la separación óptima que debe haber entre las dos antenas –emisora y receptora– es según la fórmula  $S = \frac{2}{\sqrt{\epsilon_r - 1}} P$ , donde  $P$  es la profundidad de penetración (Gómez López 2008).

Cuando se realiza una prospección física mediante georadar, normalmente lo que se utiliza es un equipo en el que la separación entre las antenas es siempre un valor fijo determinado por el fabricante. Estas antenas poseen polarización lineal y están generalmente situadas de forma que el campo eléctrico está orientado en la dirección perpendicular al movimiento en una línea de medida.

i. La profundidad de penetración

La profundidad de penetración viene determinada por la potencia del pulso emitido, la frecuencia de la antena y por las pérdidas en el subsuelo, bien por conducción o polarización. Las condiciones del subsuelo pueden variar enormemente en función de su contenido en agua o de las condiciones atmosféricas.

### 5.1.3.2. Métodos

Con las antenas monoestáticas la adquisición de datos puede hacerse de tres maneras: por perfiles, punto a punto, o por sondeos. Con las antenas biestáticas, además de los métodos anteriores, también se pueden aplicar la técnica del punto medio común y la transiluminación o tomografía. Asimismo, cuando se dispone de antenas tipo *borehole* los métodos a emplear son el *crosshole* o el método *surface-to-borehole* (Martín Gutiérrez 2004). A continuación pasamos a analizarlos:

#### Modo continuo: adquisición de datos por perfiles

Consiste en ir tomando datos de manera continua a medida que las antenas se desplazan por el terreno. Esto puede hacerse estableciendo un número fijo de mediciones por cada intervalo de tiempo (en cuyo caso es necesario que las antenas puedan desplazarse sin problemas por la zona y a una velocidad constante) o bien estableciendo un número de mediciones por unidad de distancia, para lo cual será necesario disponer de un odómetro o elemento que marque la unidad de distancia establecida.

Para realizar el levantamiento es útil dotar al equipo de un GPS, y llevar todo el trabajo georeferenciado. La antena puede estar situada tocando la superficie del medio que se desea estudiar, aunque no es imprescindible (Rodríguez Abad 2009).

### Adquisiciones puntuales

La adquisición de datos puntuales se realiza colocando la antena (monoestática o biestática) en un punto del área de estudio. En dicho punto, y sin realizar desplazamiento alguno de las antenas, se realiza la emisión de energía y adquisición de datos. De este modo disponemos de información sobre la vertical del punto donde se ha situado la antena. Si son dos, la información corresponderá con la zona que queda entre ambas, que es donde se produce la reflexión.

Este tipo de tipo de prospección se realiza cuando por determinadas razones no es posible ir desplazando la antena de un modo continuo por toda la zona de trabajo.

### Método del punto medio común

Este método es uno de los que se emplean para calibrar los equipos de georadar por lo que queda explicado en el apartado 5.1.2.1.

### Transiluminación y tomografía

Cuando el elemento a analizar es un muro o un elemento que tiene dos superficies paralelas, el método que se emplea es la transiluminación y la tomografía. Se necesitan antenas de alta frecuencia en muros, columnas, etc. y de baja frecuencia en túneles, minas, etc.

Para proceder con la técnica de la transiluminación debe colocarse una de las antenas en una superficie, y la receptora en la superficie opuesta. Una de estas antenas permanecerá fija durante toda la prueba, mientras que la otra se irá desplazando por la superficie, siendo en todo momento la posición de ambas y la distancia entre ellas conocidas.

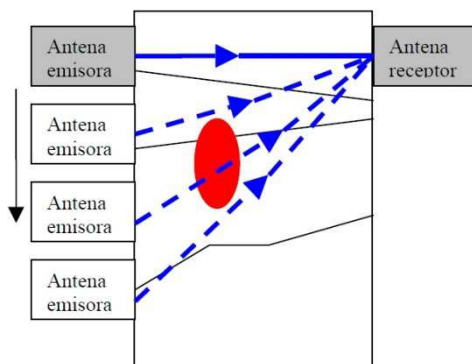


Figura 22. Adquisición de datos en un muro o superficie vertical mediante transiluminación.

Este método permite la realización de tomografías, pudiéndose obtener con estas imágenes bidimensionales, variaciones de velocidad dentro de un mismo medio debidas a pequeños cambios de la permitividad dieléctrica efectiva, que a su vez está relacionada con cambios de material o variaciones en las condiciones de éste. También se realizan tomografías en las que se analizan los cambios de amplitud en la onda, trabajando sobre atenuaciones en vez de hacerlo sobre la velocidad.



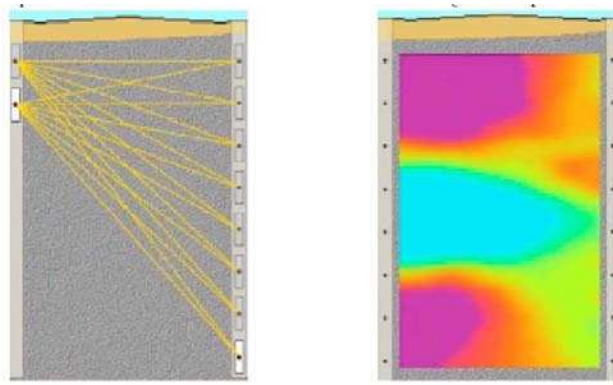


Figura 23. Resultados de la tomografía GPR..

### Reflexión refracción de "Wide Angle Reflexion and Refraction-WARR"

Este método de estudio se realiza únicamente con antenas biestáticas. Consiste en dejar una de las dos antenas fija y desplazar la otra aumentando la distancia entre ambas. Se suele aplicar esta metodología en medios donde las superficies reflectoras son aproximadamente planas y paralelas a la superficie. En este caso, realizando la hipótesis de que se trata de medios homogéneos es posible estimar las velocidades verticales de cada material entre discontinuidades. La permitividad se calculará una vez sea conocida la velocidad de propagación de la onda.

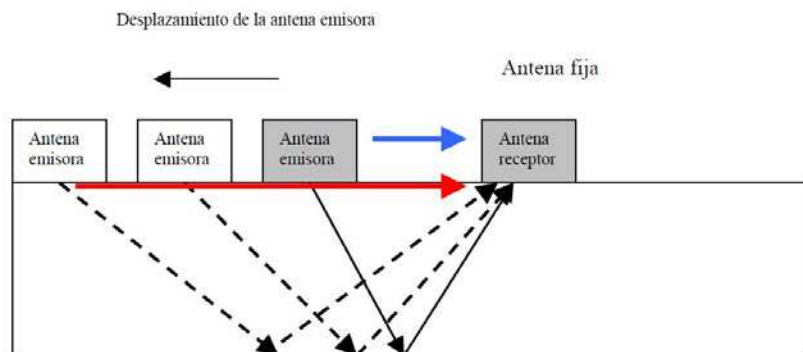


Figura 24. Adquisición de datos con el método WARR. Las ondas directas son las de color rojo, las reflejadas son las negras y la onda aérea es la azul.

Este método (cuya representación son gráficas de tiempo-distancia) comprende diferentes elementos:

- La onda aérea: la que se propaga directamente por el aire de una antena a otra con una velocidad próxima a 30 cm/ns.
- La onda directa: la que se propaga por el medio superior a la velocidad del primer medio, igual que la primera reflexión.
- Las ondas reflejadas: una por cada contraste electromagnético en el medio.
- Las ondas refractadas: registradas como rectas en el radargrama una por cada discontinuidad electromagnética del medio siempre y cuando la velocidad de propagación sea mayor en el medio inferior que en el superior.

## Sondeos

Cuando se realizan sondeos, además de las antenas monoestáticas o biestáticas, también es posible emplear un tercer tipo denominado antenas *borehole* que consiste en un transmisor y un receptor construidos en sondas separadas que a su vez están conectadas por fibra óptica a la unidad de control. Los modos para utilizar estas antenas son el *crosshole* y el *surface-to-borehole*.

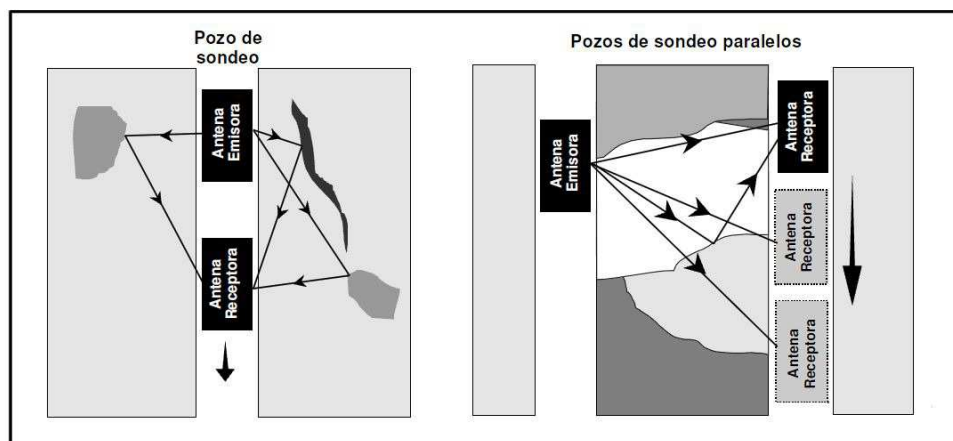


Figura 25. Estudio de sondeos utilizando antenas biestáticas. La figura de la izquierda corresponde al estudio de un solo pozo, mientras que a la derecha son dos pozos paralelos.

### 5.1.4. Procesado de los datos

Concluida la fase de recogida de datos, es necesario procesar toda esa información y hacerlo de una manera coherente, ya que un mal tratamiento de los datos puede hacer que los resultados obtenidos queden alejados de la realidad. La interpretación no es para nada un proceso sencillo ya que intervienen múltiples factores y parámetros.

El proceso de interpretación de datos se inicia durante su adquisición en campo ya que deben observarse y anotarse las condiciones del entorno y que pueden influir en los registros, así como los posibles eventos que pudieran introducir ruido en el radargrama (Pérez Gracia, María de la Vega 2001). Ejemplos de estas anotaciones son, entre otros, la rugosidad de la superficie sobre la que se desliza la antena, la presencia de posibles reflectores externos, la existencia de líneas de alta tensión, etc.

Hoy en día no disponemos de un estándar acerca de este proceso, y ni siquiera los distintos investigadores de la materia se ponen de acuerdo en las correcciones que es necesario aplicar, así como el orden en el que éstas se deben producir (Ortiz and Crespo 2008). Como veremos, muchos de estos procedimientos pueden aplicarse durante, o después de la prospección. Algunos investigadores consideran que las mejores interpretaciones se obtienen si se realiza la adquisición y almacenamiento de datos de las dos formas diferentes: con filtros aplicados, y sin ellos. Durante la interpretación y tratamiento deberían compararse ambos registros (Conyers and Goodman 1997).



En el siguiente punto vamos a explicar algunas de las correcciones más significativas extendidas entre los usuarios. En la tesis doctoral de Pérez-Gracia (Pérez Gracia, María de la Vega 2001) se puede encontrar un análisis mucho más profundo y completo de todos estos procedimientos.

#### 5.1.4.1. Correcciones aplicables a los datos brutos

Parece lógico que el primer paso sea visualizar detenidamente los datos recopilados por el radar y corregir posibles errores que resulten evidentes, así como ordenar todos los registros adecuadamente, unir ficheros, etc., es decir, (1) editar el fichero.

Los radargramas están definidos por una serie de parámetros que se recogen en la cabecera del registro generado. Se trata de un archivo de texto en el que se incluye información acerca del nombre del fichero, fecha de registro, fechas de modificaciones posteriores, rango, posición inicial, número de pulsos emitidos por segundo, filtros aplicados bien durante la adquisición o posteriormente en el laboratorio, etc.

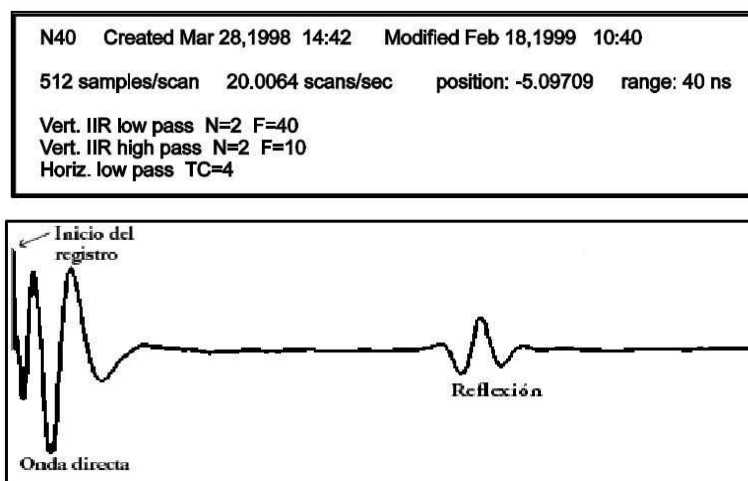


Figura 26. Cabecera de un registro obtenido con el georadar y la traza correspondiente.

Durante el proceso de adquisición de datos, puede realizarse la suma o superposición de trazas adyacentes (*stacking*). El número de trazas superpuestas es un parámetro a determinar en función del estudio a realizar.

Este procedimiento se utiliza para mejorar la relación entre la señal y el ruido fundamentalmente cuando este último es aleatorio, es decir, cuando se trata de eventos que no se registran para tiempos iguales en varias trazas consecutivas. Una superposición excesiva de trazas puede hacer que no se aprecie nada en el radargrama. Normalmente para que la imagen obtenida pueda considerarse continua no deberían superponerse más de 3-6 trazas (Maijala 1992).

Dentro de esta primera fase se incluye la corrección del origen de tiempos (*time zero*) o corrección de tiempo cero. Los radares modernos toman el origen de tiempo automáticamente usando como referencia la primera reflexión significativa que llega a la antena receptora y que es debida a la interfaz suelo-aire.

Este paso es importante porque, en caso de no tomar correctamente los orígenes de tiempo, aparecerán desalineadas reflexiones que en realidad ocurren a la misma profundidad y por tanto se pueden cometer errores de interpretación de los resultados, así como en el cálculo de la profundidad de las anomalías detectadas en el subsuelo. El desplazamiento del origen de tiempos puede tener lugar debido a cambios de temperatura de la instrumentación electrónica, defectos en los cables de conexión, posibles obstáculos en el terreno, vegetación, etc.

La calibración del origen de tiempos se realiza con la antena posicionada sobre el terreno de manera estable y lo más plana posible. Cuando se calibra el origen del tiempo, la primera reflexión visible normalmente se corresponderá a la interfase aire-suelo del terreno y todas las siguientes provendrán del subsuelo. En las trazas, esta primera reflexión aparecerá como la primera gran amplitud de la onda después de un intervalo de tiempo sin registrar ningún dato.

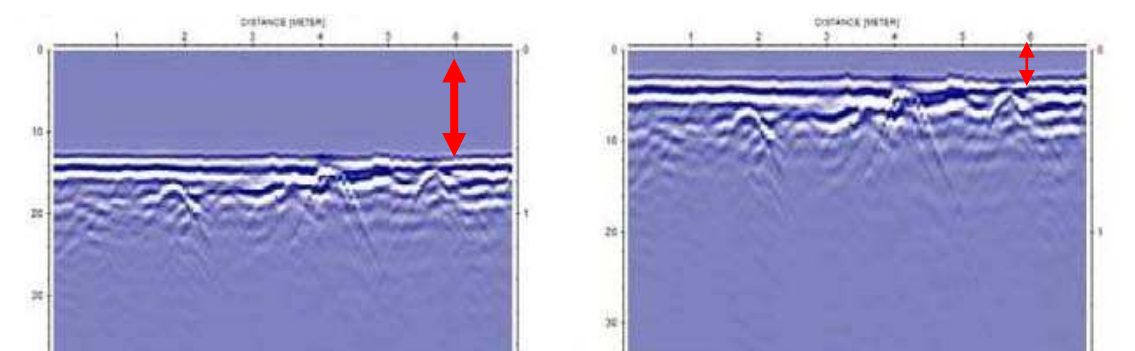


Figura 27. Radargrama original y corregido del origen de tiempos.

La siguiente actividad (2) consiste en la aplicación de filtros temporales, también denominados filtros verticales debido a que la escala de tiempos se representa verticalmente. Estos filtros se emplean para eliminar de los radargramas ruido de altas o bajas frecuencias, así como frecuencias pertenecientes a una banda concreta. Estos ruidos pueden haber sido generados bien por el propio radar durante la adquisición de los datos, o bien pueden deberse a interferencias externas debidas a teléfonos móviles, antenas de radio, etc. Al utilizar estos filtros hay que tener especial cuidado para no eliminar información válida.

Uno de estos filtros es el filtro *dewow* –imprescindible en el procesado de los datos- y que se utiliza para eliminar los elementos (de baja frecuencia) que aparecen debido a los campos estáticos asociados a la electrónica de la antena y a campos de inducción cercanos. El filtro calcula el valor medio de las muestras encontradas al mover una ventana temporal a lo largo de una traza y substrahe este valor a la muestra central de dicha ventana. El proceso se repite a lo largo de todas las trazas de la prospección.

La aplicación de algoritmos de ganancia (3) puede llevarse a cabo antes o después del filtrado aunque teniendo en cuenta que el proceso de ganancia temporal no es un proceso lineal es preferible hacerlo después del filtrado.

Debido a las pérdidas por conducción, polarización y reflexión y a que el frente de ondas se extiende de forma esférica, las señales electromagnéticas que se propagan en el subsuelo sufren una fuerte atenuación. Como consecuencia, las reflexiones que llegan más tarde debido a su mayor profundidad siempre llegan con amplitudes mucho más pequeñas que las

primeras, siendo muy difícil obtener información de ellas a no ser que se amplifiquen. La amplificación necesaria en las señales para compensar este efecto de atenuación se puede estimar considerando que la energía es una función inversamente proporcional al cuadrado de la distancia recorrida. Los algoritmos que llevan a cabo esta amplificación se denominan algoritmos de ganancia temporal, siendo los más utilizados el control de ganancia o normalización de la energía, la de compensación de la atenuación exponencial, también denominada decaimiento de energía, la ganancia exponencial, lineal y exponencial y lineal.

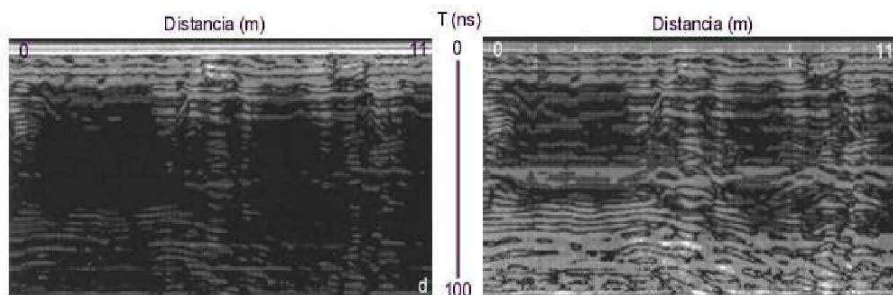


Figura 28. Ejemplo de aplicación de ganancia. La imagen izquierda es el original y la derecha la transformada donde se pueden apreciar con mayor nitidez las reflexiones que se han producido en las mayores profundidades.

La aplicación de filtros de baja (*subtracting filter*) y alta frecuencia (*running filter*) (4) es la siguiente de las correcciones. Ambos filtros, inicialmente, para cada traza  $T$  de la línea de medida a la que se aplica el algoritmo, generan una traza promedio  $T_p$  de entre un número  $N$  de trazas elegibles en ese entorno. De todas esas trazas,  $N/2$  se toman a la izquierda y las otras  $N/2$  a la derecha de la traza  $T$ . Para generar la traza promedio se usa también la propia traza.

En una segunda fase estos filtros actúan ya de forma diferenciada ya que mientras que en los de baja frecuencia el promedio se sustrae a la traza, en los de alta frecuencia  $T$  se sustituye por  $T_p$ .

Un caso particular de los filtros de baja frecuencia es aquel en el que el promedio se hace utilizando todas las trazas que conforman el radargrama con lo que solo se filtran las bandas horizontales que ocupan toda la línea de medida. En este caso el efecto del filtro es eliminar bandas horizontales “*background removal*” que pueden aparecer a lo largo de la imagen debido al ruido generado por el propio georadar o a interferencias electromagnéticas y que pueden impedir la visualización de reflexiones importantes.

Cuando se pasa el georadar por encima de un objeto de pequeño tamaño, comparado con la longitud de onda del pulso emitido, lo que se obtiene es una hipérbola cuyo vértice marca la posición del objeto, cuando lo ideal sería poder obtener un punto bien definido. Estas distorsiones están causadas por la anchura del haz de la antena que detecta el objeto antes de quedar ésta situada sobre su vertical. Mediante el proceso de migración (5) se eliminan los brazos de las hipérbolas generadas debido a la presencia de pequeños elementos. Para utilizar esta corrección es necesario conocer la velocidad de la señal en el medio.

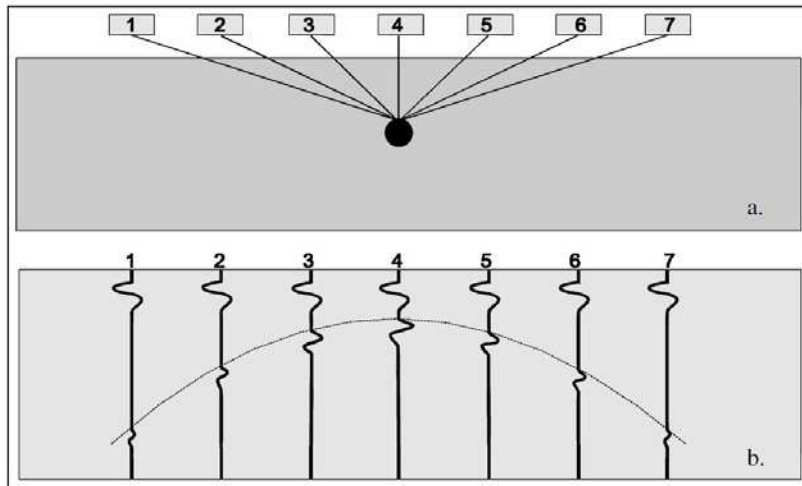


Figura 29. Esquema de formación de hipérbolas al detectar pequeños objetos. La antena detecta el objeto mucho antes de situarse sobre su vertical lo que hace que se forme dichas hipérbolas.

Finalmente es necesario realizar las correcciones estáticas (6) que tienen como objetivo corregir los efectos producidos en los registros por la topografía de la superficie en la que se han trazado los perfiles y también los efectos ocasionados por variaciones bruscas en la velocidad de propagación de la onda en el medio.

Estas correcciones consisten en determinar los desplazamientos temporales de los eventos registrados respecto de los que se registrarían si el perfil se hubiese trazado sobre una superficie totalmente plana y en el medio la permitividad dieléctrica fuese constante a lo largo de todo el perfil.

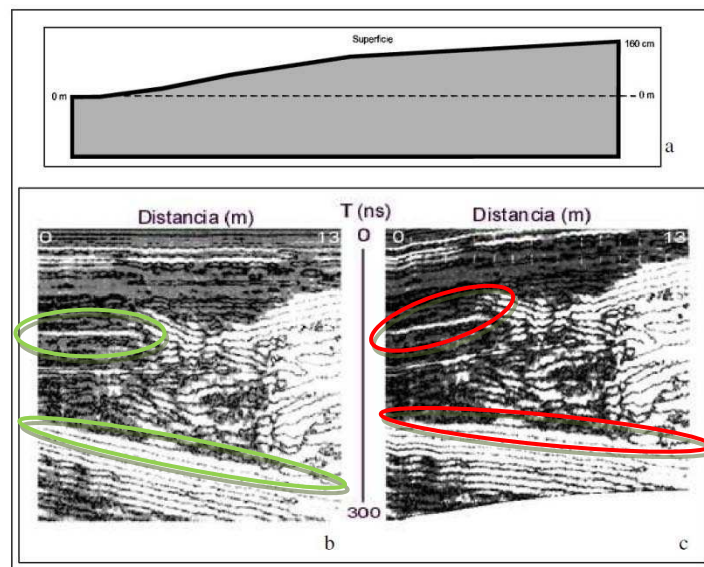


Figura 30. Efecto que producen las correcciones topográficas sobre un registro de campo dado un perfil concreto.

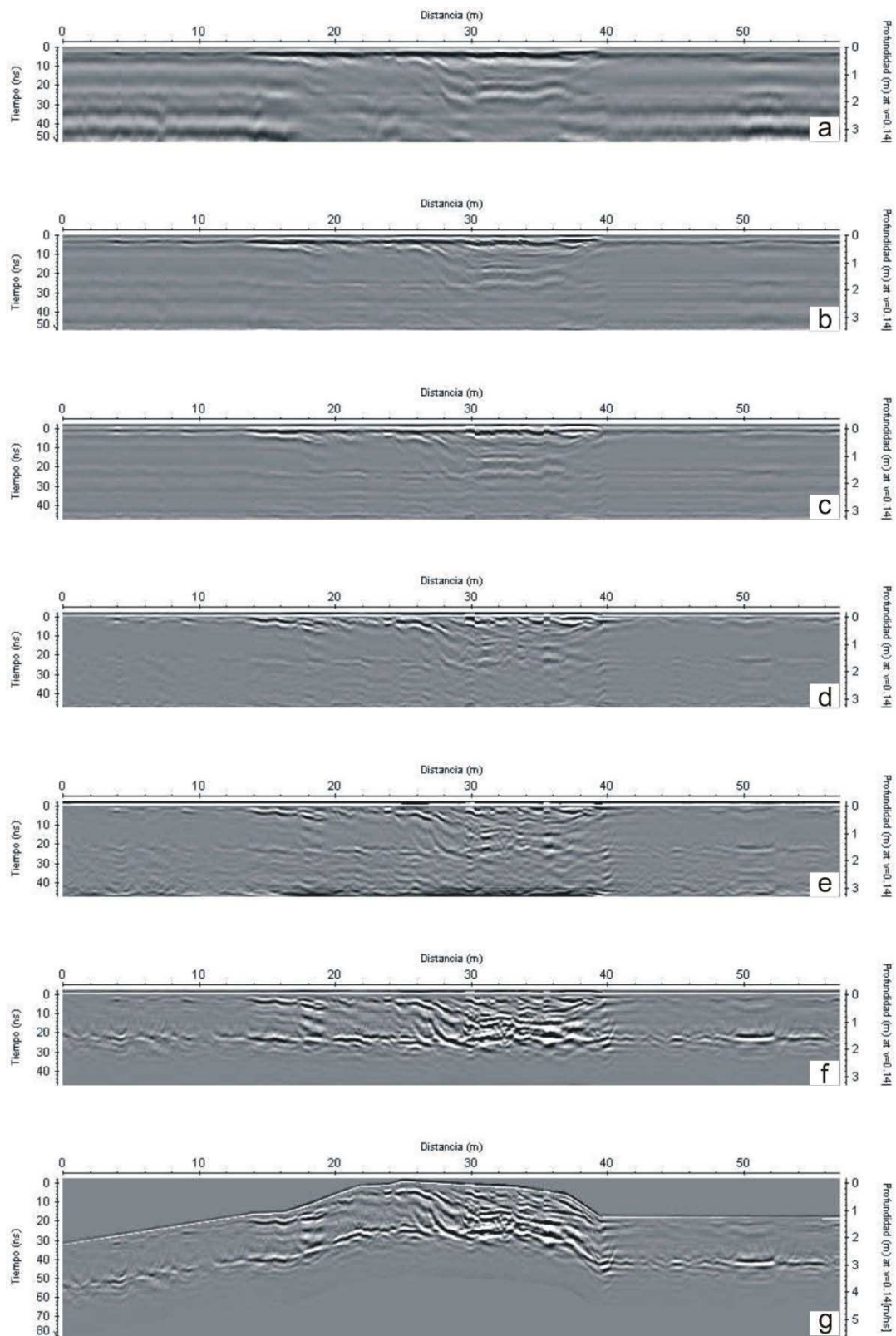


Figura 31. Ejemplo de la secuencia de procesado de un radargrama realizado en una duna: a) datos crudos obtenidos en campo; b) radargrama original tras aplicar el filtro dewow; c) tras aplicar la corrección de tiempo cero y un filtro de banda; d) una vez aplicado el filtro espacial de paso alto; e) radargrama migrado; f) radargrama final aplicando una nueva curva de ganancia y g) resultado final tras la corrección de elevación.



#### 5.1.4.2. Software

Lógicamente, para poder efectuar las correcciones indicadas en el punto anterior, es necesario recurrir a distintos paquetes de software. Algunos de estos programas son:

- Reflexw<sup>17</sup>: se trata de un programa para el procesado y posterior interpretación de las señales reflejadas por el georadar. Tiene dos partes: el análisis 2D y el análisis 3D. En el primero de ellos es donde se obtienen los radargramas o B-Scans, mientras que el segundo posibilita ver los resultados en 3D, realizando representaciones en forma de cubos, superponer radargramas, rotarlos, etc. Dispone de un amplio abanico de filtros y ganancias para poder aplicar, no existiendo aparentemente problemas de incompatibilidades por el empleo de equipos radar determinados. El precio de una licencia que incluya los dos módulos está en torno a los 2.400€ (mayo 2011).
- GPR-Slice<sup>18</sup>: Es un software más enfocado a la representación final de los resultados obtenidos, de una manera sencilla y fácil de entender, posibilitando la creación de gráficos en 2 o 3 dimensiones, habiendo incorporado la 4ª dimensión este mismo año. Admite datos procedentes de la mayoría de software. La licencia del módulo básico cuesta 11.000\$ a los que hay que añadir el precio de las distintas extensiones disponibles (cálculo multicanal, simulaciones, túneles, carreteras, mantenimiento, etc.)
- Radan<sup>19</sup>: software de post proceso, compuesto por varios módulos entre los que destacan el de 3D, puentes, carreteras o estructuras.
- GRED<sup>20</sup>: software para el tratamiento de datos radar. Está compuesto por el módulo básico, más una serie de extensiones, estando una de ellas especializada en investigaciones arqueológicas.

#### 5.1.4.3. Representación de las medidas

Como acabamos de ver en el punto anterior, la salida final con los resultados de los datos procedentes de una prospección con georadar, puede hacerse de maneras diversas, ya sea mediante gráficas 3D, perfiles, cortes, etc. Como ya comentamos en el punto 5.1.3.1, las principales formas en las que nos encontramos los datos brutos de estos análisis eran las trazas o las escalas de color. Ahora vamos a tratar de analizar qué otras salidas se pueden obtener a partir de estos datos iniciales.

Los georadares suelen tener una frecuencia de radiación de pulsos electromagnéticos hasta 200KHz, siendo actualmente imposible hacer de una sola vez el muestreo completo de cada una de las muestras generadas por cada pulso emitido. En la mayoría de los equipos se selecciona automáticamente el número de muestras total con el que se digitaliza la respuesta, siendo lo más habitual una selección entre 128, 256, 512, 1024 o 2048 muestras, dependiendo del ancho de banda del pulso radiado.

<sup>17</sup> <http://www.sandmeier-geo.de/index.html>. La última versión es la 6.0 del 23-05-2011

<sup>18</sup> <http://www.gpr-survey.com/>. La última versión es la 7.0

<sup>19</sup> <http://www.geophysical.com/software.htm>. La última versión es la 7.0

<sup>20</sup> [http://www.idscompany.it/page.php?f=131&id\\_div=4](http://www.idscompany.it/page.php?f=131&id_div=4).

En la práctica, con objeto de asegurarse una buena medida y minimizar los efectos de ruidos y errores, lo que se hace es digitalizar varias veces la respuesta completa y hacer un promedio entre todas ellas. Dicho promedio es lo que constituye el A-Scan.

Hay que tener en cuenta que cuanto mayor sea la ventana temporal de la traza, más lentamente se deberá mover la antena a lo largo de una línea de medida. Una vez elegida esta ventana, el número de muestras digitales necesarias para registrar una onda reflejada lo establece el georadar. Cuantas más frecuencias de muestreo, mayor precisión se obtiene en la onda reflejada y cuanto más tiempo esté abierta la ventana mayor será el número de muestras necesarias para definir dicha onda.

En una exploración con georadar se toman medidas en diferentes posiciones a lo largo de una recta denominada línea de medida. Cuando se agrupan las trazas que han sido almacenadas a lo largo de una dirección se obtiene una imagen denominada radargrama o B-Scan y que muestra toda la información obtenida. La escala vertical corresponde al tiempo que tarda el pulso en incidir sobre una anomalía en el terreno, ser reflejada y posteriormente recibida por la antena.

Un conjunto de radargramas generados en líneas paralelas pueden unirse entre sí para formar un mapa tridimensional del subsuelo, denominado radargrama 3D o C-Scan.

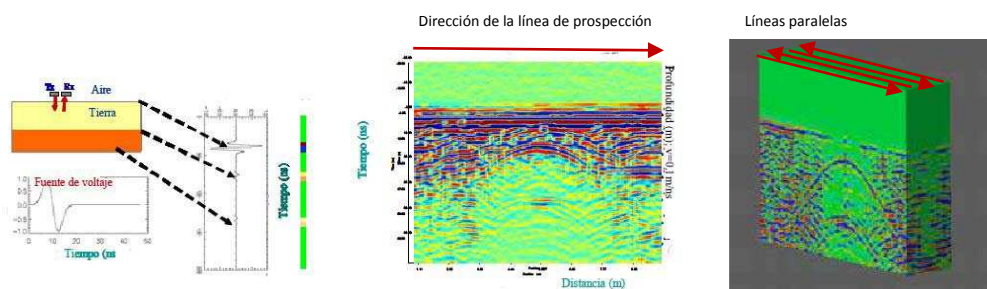


Figura 32. Ejemplo de representación de las medidas obtenidas con el georadar: A, B y C-Scans.

#### 5.1.4.4. Interpretación de los radargramas

La parte más subjetiva de la aplicación del método del georadar es la interpretación de los resultados. Para minimizar esta subjetividad es preciso disponer de cuanta más información externa e independiente mejor, además de intentar interpretar las reflexiones obtenidas de una manera sistemática y ampliamente aceptada.

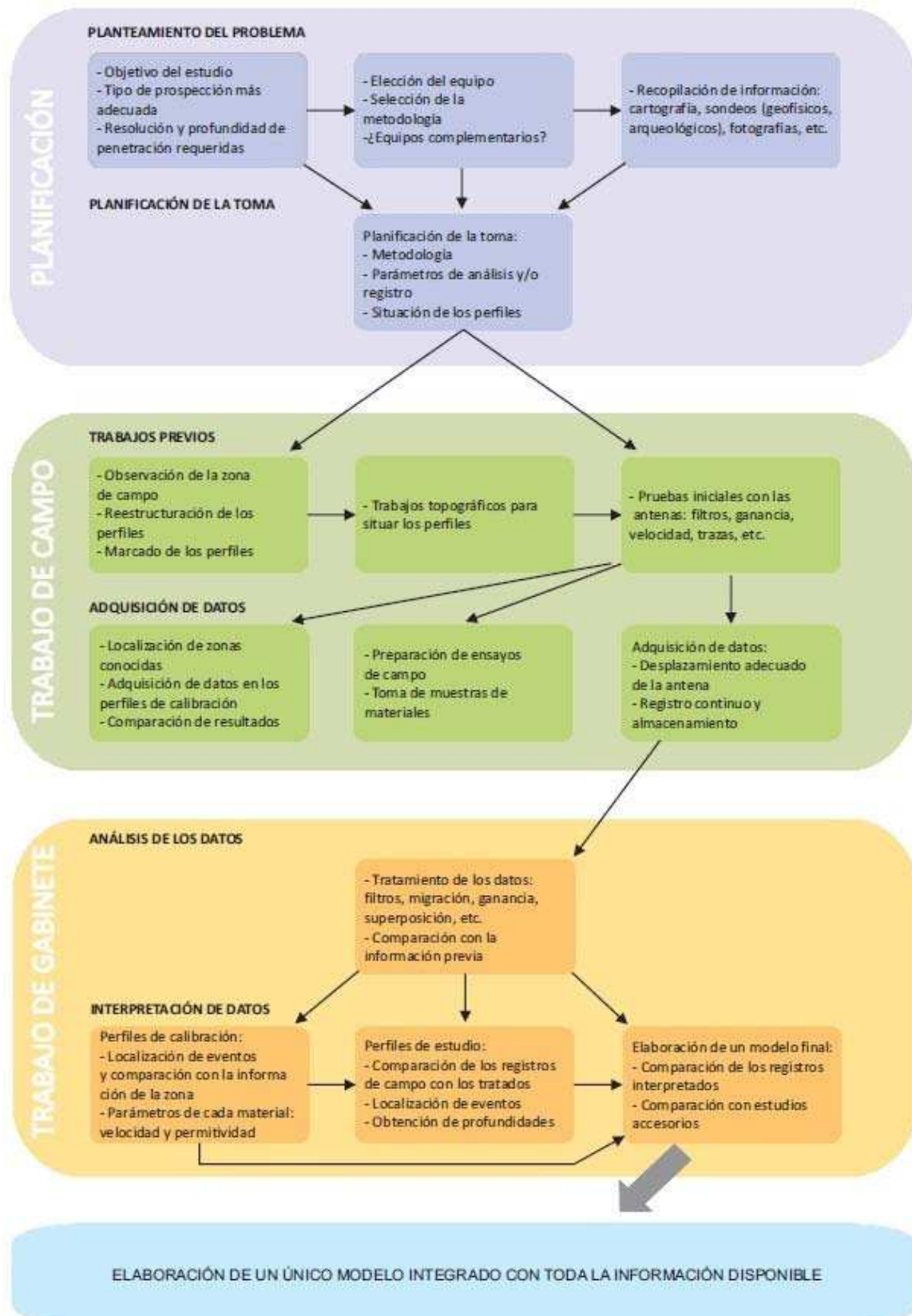


Figura 33. Esquema del proceso seguido en un estudio con georadar, desde la planificación hasta la obtención de los resultados finales.



## 5.2 Termografías

Las termografías, al igual que el resto de técnicas no destructivas, tienen la ventaja de ser un método de inspección rápido, en el que no se requiere el contacto físico con el objeto y cuya radiación, al contrario de lo que ocurre con los rayos X, no es nociva, pudiéndose aplicar en un amplio rango de materiales (Gambín, *et al.* 2005). Por el contrario, tiene el inconveniente de que apenas profundiza unos pocos centímetros sobre la superficie del objeto estudiado (Maierhofer, *et al.* 2006). Los primeros estudios acerca de la transferencia, distribución y medición del calor sobre la superficie de los elementos fueron desarrollados a finales de los años 60, y desde entonces no se ha dejado de investigar en este campo científico<sup>21</sup>. Sin embargo, la aplicación de las técnicas termográficas al estudio del patrimonio construido es algo más reciente. Un ejemplo cercano es el de los trabajos previos para la confección del Plan Director de Restauración de la Catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz en 1996 (Azkarate, *et al.* 2001) donde se aplicó esta técnica para comprobar la estereonomía de algunas de las bóvedas, además de realizar una inspección térmica de las superficies en el interior del templo.

Las aplicaciones de las termografías son muchas y muy variadas. Se usan en el análisis de instalaciones eléctricas, de piezas mecánicas, en el estudio de la eficiencia energética de los edificios, defectos de fabricación, lugares de mala visibilidad u observación nocturna, medicina, medio ambiente, etc. En edificios con alzados revocados, estas termografías pueden ser empleadas para varios propósitos (Binda, *et al.* 2000):

- i. Detección de elementos estructurales ocultos, como pueden ser suelos, arcos, entramados.
- ii. Clasificación de la mampostería o sillería, y generación de mapas sobre la heterogeneidad de los materiales que forman un edificio.
- iii. Evaluación de los daños en estructuras con grietas.
- iv. Detección de vacíos o desperfectos.
- v. Detección de superficies de deterioro.
- vi. Evaluación de las argamasas, ladrillos o piedras y sus propiedades físicas.

### 5.2.1. Fundamentos de las cámaras termográficas

El fundamento de las imágenes térmicas está basado en la fórmula de Planck, según la cual todo cuerpo cuya temperatura sea mayor que 0 K (-273°C), es decir, que esté por encima del cero absoluto, emite radiación de modo que, cuanto mayor sea esta temperatura, mayor será la cantidad de energía transmitida.

En muchas ocasiones, medir la temperatura del objeto de estudio es una tarea difícil -a veces directamente imposible- por lo que se hace necesario introducir otra variable relacionada con la temperatura; será la transmisión de calor por radiación la que nos permita conseguir ese dato, sin necesidad además de contacto físico con el elemento.

La superficie de cada material posee una serie de propiedades térmicas (densidad, calor específico, conductividad y difusividad), propiedades espectrales (emisividad, absorción, reflexión y transmisión), y otras (porosidad, masa volumétrica, contenido en agua) las cuales

---

<sup>21</sup> En (Astarita, *et al.* 2000) podemos encontrar una síntesis de varios de estos trabajos.

son fundamentales para entender el comportamiento de las termografías (Avdelidis and Moropoulou 2004).

Las que tienen que ver con su comportamiento frente a la radiación - emisividad, transmisividad y reflectividad- no se manifiestan en todos los cuerpos; en los cuerpos opacos, únicamente puede darse la emisividad y la reflectividad, ya que la radiación térmica no es capaz de atravesar un cuerpo (Puente Crespo and Rodríguez Rodríguez 2004).

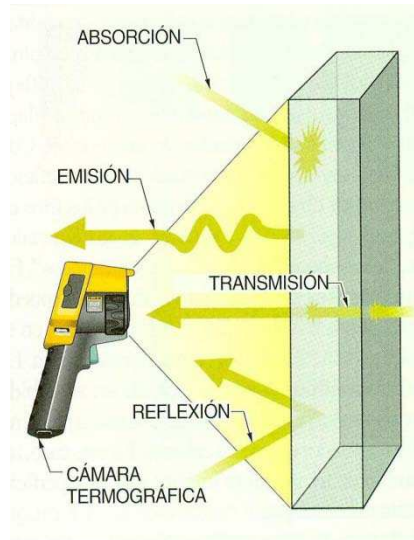


Figura 34: Radiación detectada por un equipo de medición.

La emisividad – o el coeficiente de emisividad  $\epsilon$ - indica la radiación de calor de un cuerpo comparado con la radiación de calor de un cuerpo negro (aquel que absorbe toda la energía que cae en su superficie). La reflectividad indica la fracción de radiación incidente que es reflejada por una superficie.

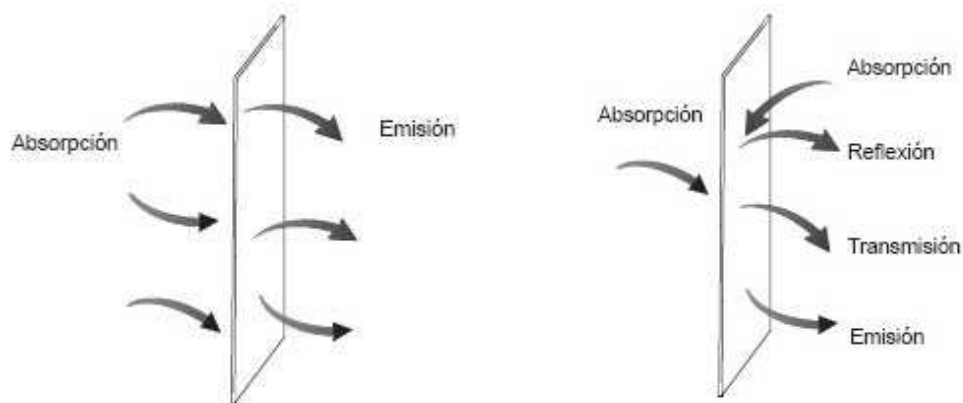


Figura 35. Diferencias entre el comportamiento de un cuerpo negro (izquierda) y un cuerpo real. El cuerpo negro, cuyo valor de emisividad es uno, absorbe y emite el 100% de la energía. En el cuerpo real parte de la energía se refleja y/o emite, siendo el valor del coeficiente de emisividad inferior a uno.

La precisión de las medidas dependerá en gran parte del conocimiento que se tenga del coeficiente de emisividad de las distintas superficies; no obstante, un error en la determinación de este valor lleva únicamente a un pequeño desfase en la medida de las temperaturas (Astarita, *et al.* 2000).

MATERIAL	COEFICIENTE DE EMISIVIDAD ( $\epsilon$ )
Cuerpo negro	1,00
Asfalto	0,93
Ladrillo, áspero rojo	0,90
Ladrillo, arcilla refractaria	0,75
Azulejos	0,63
Cristal	0,92
Granito	0,45
Acero suave	0,20-0,32
Yeso	0,98
Pintura	0,96
Papel	0,93
Plástico	0,91
Arena	0,76
Acero oxidado	0,79
Acero pulido	0,07
Agua	0,95-0,96
Roble	0,91
Hormigón	0,90
Piedra caliza	0,98
Madera natural	0,94

Tabla 5. Coeficiente de emisividad para algunos materiales. Los coeficientes están calculados para una temperatura de 27°C (300°K), comparados con la emisividad de un cuerpo negro.

Las cámaras termográficas serán las encargadas de detectar esa radiación y convertirla en una imagen al igual que lo hacen las cámaras convencionales.

### 5.2.2. Instrumentación

Todo sistema de teledetección consta de tres elementos: el sensor, el objeto observado y el flujo energético que los relaciona. Las cámaras de infrarrojos –compuestas por un sensor y varias lentes- transforman la energía térmica radiada por los objetos en la banda infrarroja del espectro electromagnético, en una imagen visible donde cada nivel es representado por un tono o nivel de gris. Precisamente la clave de estas cámaras radica en el sensor de infrarrojo que es el que absorbe la energía emitida por los objetos que queremos medir y la convierte en una señal eléctrica. Los objetos emiten energía de forma proporcional a la temperatura de la superficie, pero la energía real detectada dependerá de la emisividad de la superficie que se quiere medir y de su entorno. Por tanto, es fundamental que antes de empezar a trabajar con estos equipos, se calibre la cámara que se va a emplear (Meola, *et al.* 2005).



Figura 36. Diseño de una cámara térmica.

El objetivo de una cámara termográfica es un sistema óptico que incorpora varias lentes individuales normalmente fabricadas de Germanio. Estas lentes además de definir el campo de visión en el que la cámara puede detectar la radiación infrarroja, también hacen llegar la cantidad adecuada de ésta al sensor. Cuando se trabaja con este tipo de cámaras se suele distinguir entre objetivos angulares y teleobjetivos. En cuanto al sensor, el más empleado en estas cámaras es el FPA (*focal plane array*- matriz de plano focal) y consta de un chip de silicio, formado por una compleja estructura, y con el que se pueden tomar varias termografías por segundo.

Las principales características a tener en cuenta en una cámara de este tipo son: (1) su sensibilidad térmica, (2) su precisión, (3) la resolución espacial y (4) la frecuencia de la imagen (Balageas).

- La sensibilidad térmica (1) –también denominada *NETD Noise Equivalent Temperature Difference*- es la menor diferencia de temperatura detectable; por tanto, cuanto más bajo sea este valor, mejor se apreciarán los contrastes térmicos.

La digitalización está directamente relacionada con el rango dinámico de temperaturas que el sistema es capaz de medir. La diferencia de temperaturas entre el fondo de la imagen y el objeto es, por lo general, lo que marca el rango dinámico, el margen entre la temperatura máxima y mínima (González Fernández 2006). Dependiendo de esos valores, el número de niveles otorgados a la digitalización establece la resolución térmica que puede alcanzarse, como se aprecia en la tabla 6.

Nº BITS	Nº NIVELES	RESOLUCIÓN TÉRMICA <sup>22</sup> (°C)
8	256 ( $2^8$ )	0.781
9	512 ( $2^9$ )	0.390
10	1024 ( $2^{10}$ )	0.195
11	2048 ( $2^{11}$ )	0.098

<sup>22</sup> La resolución térmica está calculada dividiendo el máximo rango de temperaturas a medir entre el nº de bits empleado para digitalizar la imagen.

12	4096 ( $2^{12}$ )	0.049
13	8192 ( $2^{13}$ )	0.024
14	16384 ( $2^{14}$ )	0.012
15	32768 ( $2^{15}$ )	0.006
16	65536 ( $2^{16}$ )	0.003

Tabla 6. Resolución térmica par un rango dinámico de 200°C en función del número de bits utilizados en la digitalización de las señales.

- La precisión (2) indica cuan exacta es la medida térmica de un objeto en relación a su verdadera temperatura, dato especialmente interesante cuando se realizan termografías pasivas.
- Las resolución espacial (3) se suele denominar IFOV (*Instantaneous Field Of View*-Campo de Visión Instantáneo) y expresa la capacidad de un sistema para detectar y medir de forma precisa la temperatura de un elemento pequeño. Depende fundamentalmente del detector y de las lentes (Astarita, *et al.* 2000).

IFOVmeas (*measured instantaneous field of view*) –también denominado marca de medición- es el objeto más pequeño cuya temperatura se puede medir de forma precisa con una cámara termográfica.

El campo de visión o FOV (*field of view*) describe el área representada y localizada por el detector. Se suele expresar en ángulos, independientemente de la distancia y depende del objetivo utilizado.

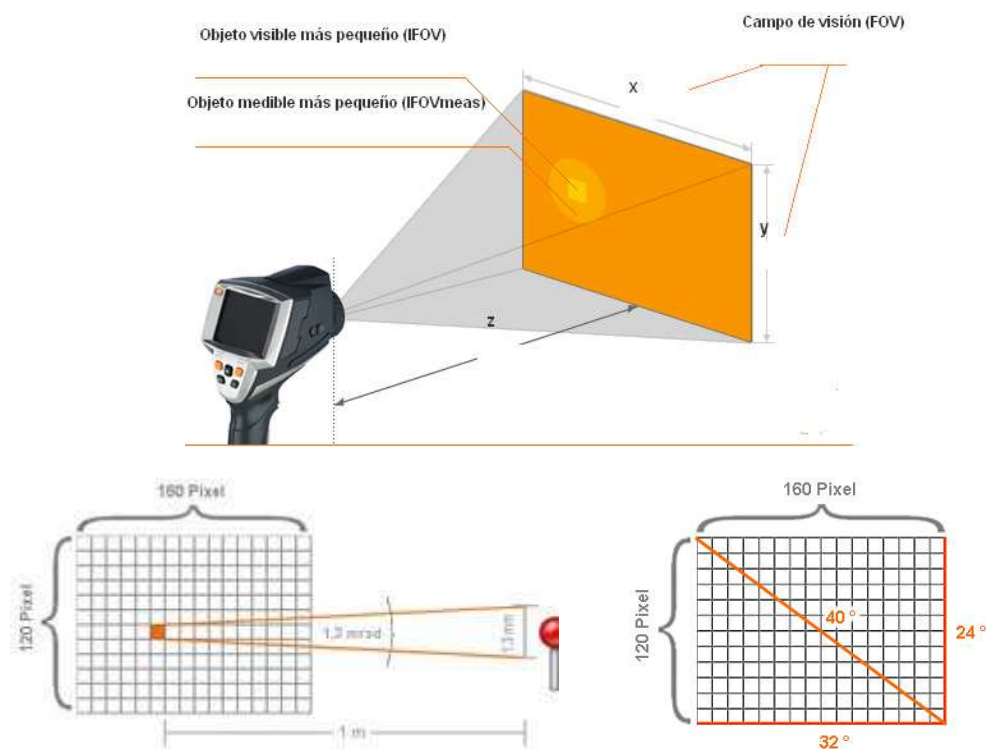


Figura 37. IFOV, IFOVmeas y FOV de una cámara termográfica.

- La frecuencia de imagen (4) es el grado de refresco o actualización en la generación de imágenes. Es importante que este valor sea alto cuando el objeto de estudio tiene cambios de temperatura relativamente rápidos.

La precisión y resolución espacial de las medidas termográficas resultan cruciales para obtener información relativa al interior del material. Los errores y el ruido han de ser minimizados al máximo (González Fernández 2006).

#### 5.2.2.1. Calibración térmica

Como todo instrumento de medición, éste debe ser calibrado en fábrica al menos una vez al año, de tal forma que se asegure el correcto funcionamiento del mismo. Para la realización de este ajuste se suelen emplear uno o varios cuerpos negros –cuya emisividad se sabe que es uno- para medir y contrastar su temperatura en laboratorio.

Al margen de esta calibración anual, cuando se utilizan las cámaras termográficas para obtener valores absolutos de la temperatura de un material, antes de iniciar el proceso, es necesario calibrar *in situ* la cámara. Esto es, a partir de un material del que se conozca su temperatura y coeficiente de emisividad, se ajustarán los parámetros de la cámara. Hay proyectos en los que no interesa conocer valores absolutos de la temperatura de los materiales si no que únicamente el objetivo de realizar termografías radica en poder identificar diferentes elementos en una misma ubicación. En estos casos se podría evitar esta segunda calibración.

Los métodos más habituales de realizar este proceso de calibración *in situ* son:

- (i) A través de una tabla previamente definida en la que aparezcan los coeficientes de emisividad de los principales materiales. A la hora de emplear este método hay que tener precaución ya que los datos que aparezcan estarán condicionados por las temperaturas de los materiales, con lo que puede que estas medidas no nos sirvan de manera muy precisa.
- (ii) Medición comparativa con un termómetro de contacto. Con este método se mide la temperatura de la superficie del objeto con un termómetro de contacto y posteriormente con una cámara termográfica en la que la emisividad esté en uno. La diferencia de temperatura que se obtenga se deberá al valor introducido como emisividad, que habrá que graduar progresivamente hasta que las dos temperaturas registradas sean aproximadamente coincidentes.
- (iii) Medición comparativa con la cámara térmica. En este caso, antes de proceder a registrar ninguna medida es necesario colocar en la superficie del objeto un trozo de cinta adhesiva o de pintura de emisividad 0.95. Habrá de esperar un tiempo hasta que la cinta y el objeto alcancen la misma temperatura. Tras ese periodo, se mide la temperatura en la cinta, sirviendo el valor obtenido como referencia. En ese momento habrá que ajustar el valor de la emisividad hasta que la temperatura que marca la cámara de la cinta y de la superficie del objeto sean iguales.

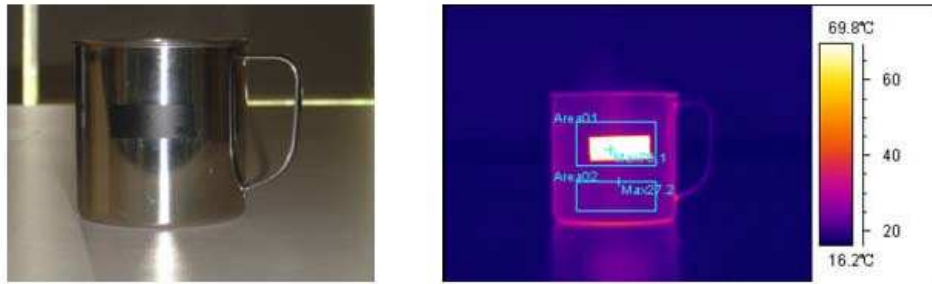


Figura 38. Ejemplo de una taza metálica con una cinta adhesiva pegada y termografía obtenida.

#### 5.2.2.1. Calibración geométrica

La calibración, a la que se hacía mención en los párrafos anteriores, está pensada para una correcta determinación de las temperaturas reflejadas por los distintos materiales. Sin embargo, existe otra posible calibración cuyo objetivo es determinar los parámetros internos de la cámara (focal, punto principal y distorsiones) para que ésta pueda ser empleada con fines métricos.

Existe muy poca bibliografía al respecto si la comparamos con la literatura disponible sobre la calibración métrica de cámaras convencionales. En (Lagüela, *et al.* 2011a) y en (Luhmann, *et al.* 2010) se puede consultar un interesante y económico sistema de calibración de estos equipos basado en el fotografiado de patrones.

En cualquier caso, para la calibración de las cámaras térmicas es necesario el diseño de un patrón de calibración específico en el que se aprecien con nitidez los puntos y marcas de referencia. Existen varias opciones para realizar este artefacto entre las que destacamos las empleadas por Lagüela y Luhmann. El primero de ellos diseñó un tablero de madera de un metro de lado al que incorporó 64 bombillas de pequeño tamaño que cuando se encendiesen mostraran un claro contraste térmico. Luhmann por su parte, no consideró que este tipo de solución fuese la más apropiada para los fines propuestos y elaboró su propio patrón al que le incorporó una serie de señales de un material de alto contraste térmico.

Dado que la mayoría de las cámaras termográficas tienen un enfoque electrónico, el procedimiento de calibración conviene repetirlo 10 veces, el número mínimo de mediciones válidas para un estudio estadístico (Lagüela, *et al.* 2011b).

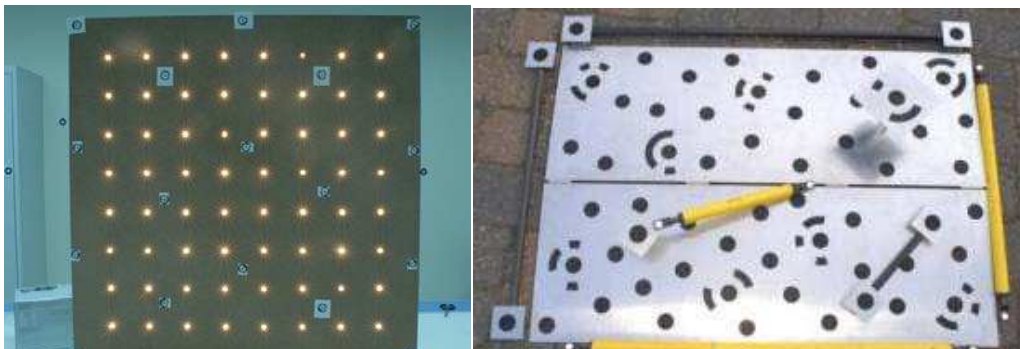


Figura 39. Diferentes tipos de patrones empleados en la calibración de cámaras térmicas.



Tras la verificación de las calibraciones obtenidas, se llega a la conclusión de que las cámaras visibles siguen siendo más estables geométricamente que las térmicas, siendo un factor fundamental de estas últimas su sensibilidad térmica. La mejora en la resolución de este tipo de cámaras, mejorará también su incorporación en procesos métricos (Luhmann, *et al.* 2010).

En ocasiones el poder trabajar de manera geométrica con las imágenes de infrarrojos supone disponer de puntos de control a los que dotar de coordenadas topográficas en un determinado sistema. Desde la Universidad del País Vasco, en colaboración con la empresa ENKLABE KST se ha comenzado a investigar en este sentido, habiéndose realizado diversas pruebas. Estos ensayos consistieron fundamentalmente en la fijación y fotografiado de dianas a distintas temperaturas; unas a temperaturas bajo cero, congeladas, y otras sin embargo, calentadas previamente a 80°C. El resultado es claramente favorecedor a este último tipo de prueba, ya que se detecta con nitidez el artefacto.

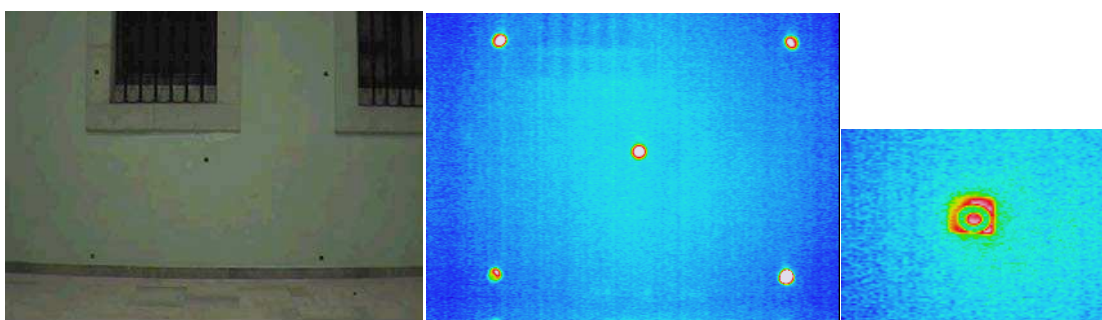


Figura 40. Imagen visible, imagen infrarroja, y detalle de una de las dianas colocadas en la imagen térmica.

### 5.2.3. Métodos de adquisición de datos

Antes de proceder a la toma de las imágenes es conveniente, siempre y cuando sea posible, recopilar información sobre el objeto de estudio, es decir, documentación sobre materiales con los que se ha construido el edificio, planos, e incluso termografías realizadas con anterioridad que nos puedan servir de referencia para su posterior interpretación.

La planificación juega un papel importante, ya que en función del momento elegido para la realización de las fotografías, el equipo de trabajo e incluso el punto de vista desde el que se pretenda sacar la imagen, el resultado puede variar considerablemente (Balaras and Argiriou 2002).

#### 5.2.3.1. Consideraciones previas

La primera decisión que habrá que tomar es la elección de la cámara termográfica teniendo en cuenta para ello la resolución de las imágenes que produce –tanto en la banda del infrarrojo como en la visible–, el campo visual, la precisión en la medición de las temperaturas, la sensibilidad térmica, el rango espectral, el rango de temperaturas en las que trabaja el equipo y la profundidad de color. La posibilidad de obtener simultáneamente la imagen térmica y la visible del objeto fotografiado, ayuda enormemente a la identificación y posterior interpretación de las fotografías por lo que también es un factor a tener en cuenta en esta primera elección.



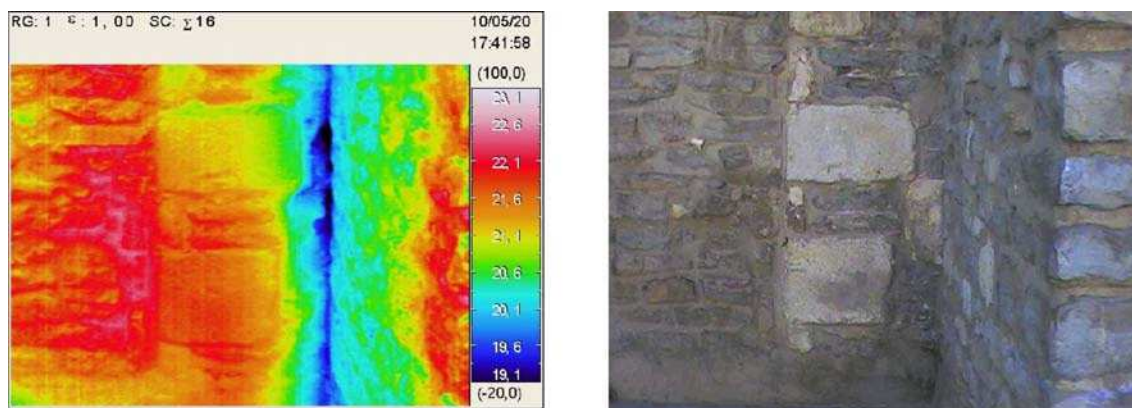


Figura 41. Imagen térmica y visible de un detalle de un alzado.

A día de hoy, un hándicap que presentan estas cámaras es la baja resolución de las imágenes obtenidas, lo que dificulta –como veremos más adelante- la utilización de estas fotografías con fines métricos. De las cámaras existentes en el mercado (mayo 2011), la que mayor resolución tiene apenas llega al medio megapíxel, en concreto el sensor tiene 640x480 píxeles.

Cuando se toman imágenes de infrarrojo, la precisión de las medidas dependerá de varios parámetros como son la emisividad (1), las partículas dispersas por la atmósfera (2), la temperatura ambiental (3), la velocidad del viento (4) y la distancia entre la cámara y el objeto fotografiado (5) (Balaras and Argiriou 2002).

- La emisividad, como ya hemos comentado con anterioridad, depende únicamente de la temperatura de la superficie y es una medida de la radiación de un cuerpo en comparación de un cuerpo negro, cuyo coeficiente de emisividad es el mayor que podemos encontrar e igual a 1. Todos los materiales no tienen el mismo coeficiente de emisividad, ya que las superficies muy pulidas, como pueden ser las superficies metálicas, apenas emiten radiación y pueden presentar unos valores de 0,05-0,2. Sin embargo hay otros, tales como el agua, el yeso o la piedra caliza, cuyos valores están cercanos al 1. La técnica más fiable para poder “calibrar” el valor de la emisividad es utilizando un instrumento auxiliar a la propia cámara, por ejemplo un termopar<sup>23</sup>. La emisividad se irá ajustando hasta que los valores de temperatura que marquen los dos instrumentos – cámara termográfica y termopar- tengan valores similares. Si las condiciones de trabajo no varían sustancialmente, estos coeficientes serán los que se utilicen para la determinación de la temperatura y por tanto para la interpretación de las termografías. Cualquiera de las otras tres técnicas descritas anteriormente valdrían para obtener este coeficiente.
- Otra posible fuente de error es la energía que se pierde en la transmisión del calor entre el objeto y la cámara. Las partículas que hay dispersas por la atmósfera – polvo, gotas de agua, vapor, etc.- hacen que la radiación se debilite provocando que la transmisión de energía se haga en dos bandas electromagnéticas; la comprendida

<sup>23</sup> Un termopar es un dispositivo formado por la unión de dos metales distintos que produce un voltaje, que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado “punto caliente” y el otro denominado “punto frío”. Estos instrumentos son utilizados como sensores de medida de temperaturas.

entre los 3-5  $\mu\text{m}$  y la correspondiente a las 8-12  $\mu\text{m}$ , ambas en el infrarrojo. Las cámaras térmicas están diseñadas para funcionar únicamente en una de estas bandas. La absorción variará en función del grosor de la capa atmosférica que debe atravesar la radiación por lo que este efecto no puede ser considerado como constante y por tanto no se puede compensar en el equipo de medida.

- La temperatura ambiente influye en la temperatura de la cámara y por tanto en su rendimiento produciendo lecturas erróneas. Por esta razón los equipos suelen venir equipados de un sistema de compensación que corrige estos problemas. Cuando se trabaja a muy altas o muy bajas temperaturas, el sistema se vuelve inestable, pero fundamentalmente con altas temperaturas externas se pueden llegar a enmascarar los datos térmicos.
- La velocidad del viento afecta también al resultado de la termografía, ya que los vientos fuertes hacen que la transferencia de calor se eleve desde la superficie y se produzcan grandes pérdidas de calor. Con vientos superiores a 5 m/s hay que tener cuidado a la hora de interpretar los datos obtenidos.
- La distancia objeto-cámara y el ángulo de visión son factores que pueden resultar determinantes para la interpretación de los resultados. La resolución de la cámara decrece a medida que nos alejamos del objeto de estudio – al igual que ocurre con una cámara fotográfica convencional- provocando que los cambios de temperatura registrados en las imágenes correspondan a elementos de mayor tamaño, perdiéndose el detalle.

La detección de anomalías, tanto superficiales como internas, suele depender del tamaño mínimo detectable, y de la diferencia de temperaturas equivalente al ruido (González Fernández 2006). Cuando el objetivo presenta un tamaño superior al tamaño mínimo detectable, se puede determinar su temperatura a partir de la radiación emitida por él. Sin embargo, cuando el objetivo presenta un tamaño inferior al tamaño mínimo detectable, la forma del objeto no puede ser discernida ya que la energía del entorno también entra en el detector como posible ruido. Este factor depende de la óptica utilizada, el tamaño del píxel del detector y de la distancia a la que se produce la medida.

### *5.3.2.2. Errores que afectan a las medidas termográficas*

En un sistema termográfico las imprecisiones en las medidas de la temperatura pueden ser debidas a errores registrados en la evaluación de los parámetros que caracterizan la radiación infrarroja, por efecto del ruido propio de todo sistema o por errores propios del aparato de medida (González Fernández 2006).

El ruido genera un error en la medida afectando a su precisión, exactitud, repetitividad y resolución, siendo sus orígenes muy variados. Los errores originados al estimar los parámetros de la transferencia de calor –fundamentalmente emisividad y reflectividad de la superficie- requieren de técnicas específicas para su corrección (apartado 5.2.2.1.), pudiéndose reducir su efecto mediante software.

### 5.2.3.3. Normativa europea

Actualmente hay pocos países en los que se estén haciendo de forma sistemática trabajos termográficos. En 1999 se desarrolló una normativa europea -DIN EN 13187- que venía a modificar a la ISO 6781:1983 y que marca las mejores condiciones para la toma de estas fotografías. La normativa está fundamentalmente pensada para hacer estudios energéticos, pero sus puntos más relevantes se pueden aplicar a cualquier trabajo de este tipo. Estas condiciones óptimas se darán cuando:

1. La diferencia entre la temperatura exterior e interior sea lo suficientemente grande para la detección de irregularidades térmicas.
2. La presión y la temperatura permanezcan constantes.
3. La temperatura exterior e interior no varíe de manera considerable.
4. No haya exposición solar directa.
5. El viento no varíe notablemente.

Muchas de estas consideraciones ya fueron tenidas en cuenta en investigaciones realizadas con anterioridad. Por ejemplo, en uno de los trabajos llevados a cabo por la Universidad del Egeo (Grecia)(Haralambopoulos and Paparsenos 1998), 72 horas antes de tomar cualquier termografía apagaban los sistemas de climatización del edificio objeto de estudio, de tal forma que las condiciones atmosféricas fuesen lo más estables posibles, además, durante el periodo que duraban las mediciones, la diferencia entre la temperatura interior y exterior debía ser de al menos 12°C. De la misma manera, en estudios realizados en laboratorio sobre las posibilidades de las termografías aplicadas al estudio de los distintos materiales que forman los edificios (Barreira and de Freitas 2007), se tenían muy en cuenta las condiciones de humedad, temperatura, presión, etc.

La normativa europea matiza aún más cada uno de los apartados anteriormente citados. Sin embargo, dada la heterogeneidad de la climatología, lo más adecuado sería amoldar dicha normativa a cada zona geográfica.

### 5.2.4. Procesado de los datos

La información que nos pueden proporcionar las termografías puede ser cualitativa o cuantitativa. Cuando se analizan las imágenes de manera cualitativa, normalmente es debido a que la termografía que se ha realizado es pasiva; no existe una fuente externa de calor o enfriamiento que se aplique sobre el elemento de estudio para provocar un flujo de calor, es decir, el objeto de estudio dispondrá de una temperatura por el simple hecho de estar involucrado en un proceso (Avdelidis and Moropoulou 2004).

Por el contrario, las termografías activas – las que proporcionan información cuantitativa- emplean una estimulación externa -normalmente de fotones- para provocar ese flujo interno de calor y después monitorizan el enfriamiento del cuerpo. Las principales técnicas son la TIR pulsada, la TIR *step heating* (termografía de pulso largo) y la TIR *lock-in* (termografía de lazo cerrado) (Gambín, *et al.* 2005).

Los resultados de estas termografías están muy en relación con algunas cuestiones que condicionan el comportamiento térmico de los materiales. Algunas de ellas ya las hemos

comentado en apartados anteriores, pero a continuación explicamos otras que creemos interesantes para una correcta aprehensión de las fotografías.

### Irradiancia

En las termografías “pasivas”, aquellas en las que no se inyecta una fuente de calor externa, la radiación solar es la principal y única fuente de calor. Esa radiación que llega a la superficie de la Tierra se denomina *irradiancia* y se mide en  $W/m^2$ . El valor de ésta sería el mismo en todos los lugares situados a la misma latitud en un momento dado si no fuera por la forma en que es parcialmente interceptada por la atmósfera; siempre en función de las condiciones meteorológicas. Por ello, el análisis de la irradiancia es un parámetro interesante para medir la influencia de la nubosidad durante el día. Sin nubosidad la curva de irradiancia comienza a ascender en torno a la salida del sol trazando una curva, prácticamente simétrica con respecto al medio día solar, y finaliza con el ocaso. Con nubosidad, por el contrario, la irradiancia puede ascender y descender independientemente de la hora del día, pudiendo incluso ser nula durante toda la jornada en situaciones de niebla o nubosidad muy espesa. Veremos más adelante que hay una relación muy directa entre la curva de irradiancia, el Comportamiento Térmico Diario y los resultados de las termografías.

### Albedo

La reflectancia espectral es también conocida como *albedo*. Se trata del porcentaje de radiación luminosa reflejada por la superficie de un material (Cuadrat and Pita 2000). Las superficies con fuerte albedo (nieve, rocas,..) tienden a perder calor de forma intensa durante la noche (cuando la irradiancia cesa), en especial durante las noches despejadas y sin viento.

### Comportamiento térmico diario

Se denomina Comportamiento Térmico Diario (CTD) a la curva que realiza la temperatura a lo largo de las 24 horas del día (Cuadrat and Pita 2000). En función del tipo de CTD puede ser más adecuado realizar la toma de las termografías en un momento u otro del día.

Puede haber varios tipos de comportamiento térmico:

1. El comportamiento térmico normal sería el que se refleja en una curva de temperaturas en la que la mínima se dé en torno a la hora del amanecer (cuando comienza a aumentar la irradiancia; entre las 5 y las 8 horas, según la estación). Posteriormente la temperatura asciende sin altibajos hasta que se produce la máxima, algunas horas después del mediodía solar (entre las 14 y las 17 horas). Después comienza un descenso que se acentúa tras el ocaso (cuando el albedo es más intenso) hasta alcanzar la mínima, ya en la jornada siguiente.
2. Comportamiento Térmico Diario anormal: es cuando el CTD se sale del esquema arriba descrito. Podemos resumir las situaciones en tres tipos básicos:
  - a. Atenuado: La diferencia entre la temperatura mínima y la máxima (amplitud térmica diaria) es inferior a la habitual para el momento de estudio. Esta diferencia se ve amortiguada por varias razones, aunque en la mayoría de los casos suele ser la nubosidad su principal responsable. Por la noche ésta reduce la intensidad del

albedo, de modo que la temperatura desciende menos, mientras que durante el día entorpece un ascenso térmico como el que habría en una jornada despejada. El viento también actúa atenuando las diferencias de temperatura entre el día y la noche en función de su intensidad, ya que entremezcla las masas de aire dificultando su estratificación.

- b. Exagerado: En este caso la amplitud térmica es superior a la media habitual para el momento de la toma de datos. Las mayores amplitudes térmicas diarias se producen cuando coinciden varias de estas circunstancias propicias:
  - Temperaturas mínimas inferiores a lo habitual. Ocurre cuando en las jornadas previas ha habido abundante nubosidad, e incluso precipitaciones que han impedido el calentamiento del suelo durante el día, pero que al final de la jornada, cuando el sol ya no tiene fuerza, el cielo se despeja y el albedo se intensifica. De esta forma la temperatura mínima de la jornada siguiente es inferior a la media del mes.
  - Temperaturas máximas superiores a lo habitual. Puede suceder con una mayor frecuencia cuando durante un día despejado se produce una advección del Sur o Suroeste.
  - Presencia de viento muy flojo o en calma.
- c. Quebrado: Este CTD es el que se produce cuando se detectan constantes altibajos en la curva de temperaturas (también reflejados en la curva de irradiancia), por lo general durante días en los que hay abundantes precipitaciones y repartidas a lo largo de toda la jornada. Puede llegar a ocurrir, cuando la nubosidad y las precipitaciones son muy intensas, que los extremos termométricos diarios no se produzcan en el momento habitual.

### Calor específico

El Calor Específico (CE) es una propiedad física que mide la capacidad de los materiales para variar de temperatura. Se define como la cantidad de calor (Julios o Calorías) que hay que suministrar a una masa de una sustancia dada para elevar su temperatura una unidad de temperatura (por lo general un grado Celsius o Kelvin). Según el Sistema Internacional el CE se mide en  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (aunque normalmente también puede aparecer medido en  $\text{cal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,...). Esta magnitud junto con el CTD (dependiente asimismo de la irradiancia y del albedo) es la principal responsable de las variaciones de temperatura de apreciamos en las termografías. Como se aprecia en la tabla 7, los materiales con calores específicos más bajos necesitan menos energía para aumentar su temperatura (o lo que es lo mismo, muestran una menor resistencia a variar su temperatura).

### Conductividad y difusividad

La conductividad térmica es la capacidad de un material para transferir calor. Es el fenómeno por el cual el calor se transporta de regiones de alta temperatura a regiones de baja temperatura dentro de un mismo material o entre diferentes cuerpos.

La difusividad térmica por su parte caracteriza la rapidez con la que varía la temperatura del material ante una solicitud térmica.

MATERIAL	DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )	CALOR ESPECÍFICO (J/kg*k))	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (W/(m*k))
Acero	7850	460	47-58
Agua	1000	4186	0,58
Aire	1,2	1000	0,026
Asfalto	2120	1700	0,74-0,76
Baldosas cerámicas	1750	-	0,81
Cemento	-	-	1,05
Granito	2750	837	3
Hierro	7870	473	72
Hormigón	2200	837	1,4
Ladrillo común	1800	840	0,8
Ladrillo de mampostería	1700	837	0,66
Madera	840	1381	0,13
Madera de roble	850	2386	0,21
Mortero de cal y cemento	1900	-	0,7
Mortero de cemento	2100	-	1,4
Mortero de yeso	1000	-	0,76
Mortero para revoques	1800-2000	-	1,16
Yeso	1800	837	0,81
Vidrio	2700	833	0,81

Tabla 7. Propiedades térmicas de materiales de construcción y aislantes. Los registros resaltados en amarillo son algunos de los materiales que hemos podido detectar en las termografías realizadas.

#### 5.2.4.1. Software

Para la interpretación y análisis de las imágenes termográficas, existen distintos softwares, especializados en la generación de histogramas, elaboración de informes, análisis estadísticos, visualización y edición de las fotografías, correcciones de emisividad, composición o sustracción de imágenes, etc. Algunos de estos programas son:

- NEC San-ei NS 9500
- GTS 5.1<sup>24</sup>
- IrMOTION<sup>25</sup>

<sup>24</sup> [www.goratec.com](http://www.goratec.com)

- MikroSpec NS 9300
- MOSAIQ™
- ThermanCam

Para optimizar la efectividad del software, el usuario ha de estar familiarizado con las técnicas de tratamiento de imágenes básicas. Una vez que la señal infrarroja ha sido preprocesada y transformada en temperatura por el software -incluido normalmente en el sistema de captura-, se realiza a posteriori un tratamiento de imágenes, bien para detección de defectos internos o bien para su caracterización (determinación de propiedades térmicas, tamaño y profundidad). Una vez detectados los defectos, es posible estimar la forma y el tamaño de los mismos tras la aplicación de un algoritmo de extracción de bordes o segmentación, como pueden ser Sobel, Roberts, Canny, etc.

Finalmente, mediante el uso de métodos de inversión de la profundidad, se puede establecer la profundidad de los defectos haciendo uso tanto de los datos en el dominio temporal como en el frecuencial, si aplicamos la Transformada de Fourier discreta (TFD).

### 5.3 Láser escáner

Para la mayor parte de proyectos relacionados con la conservación y restauración del patrimonio, disponer de una buena documentación geométrica del elemento analizado – dimensiones, forma, orientación, etc.- supone un importante punto de partida y una sólida base sobre la que plasmar futuros análisis, estudios o hipótesis (English Heritage 2007).

Existe una gran variedad de técnicas de registro tridimensional, que se diferencian por la escala en la que se aplican, así como el tamaño-complejidad del elemento a documentar. Tal y como podemos ver en la figura 43, alguno de estos recursos serían la fotogrametría, la topografía clásica, los levantamientos GPS, los sensores aerotransportados o el láser escáner terrestre.

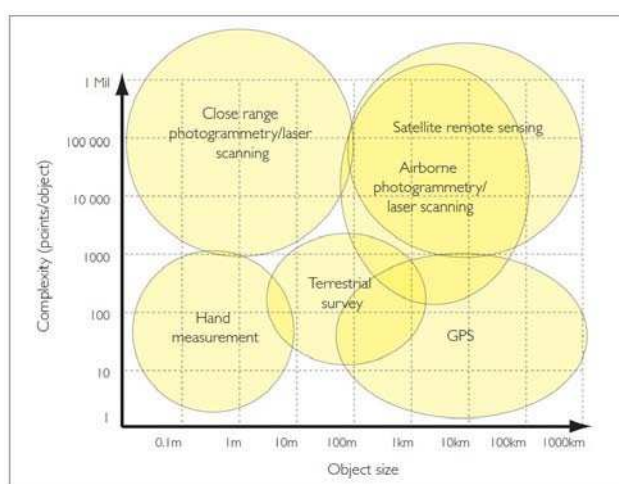


Figura 42. Técnicas de registro tridimensional en función de la escala y el tamaño-complejidad del objeto.



Los métodos topográficos tradicionales tienen la limitación de permitir solo la captura de información discreta, y aunque los métodos fotogramétricos digitales sean más eficientes, tienen el retraso temporal como principal inconveniente. Todas estas razones y más, justificaron la implantación de una nueva técnica que permitiese la medida directa y continua sobre objetos de forma tridimensional. Así, a finales de la década de los 90 se comienza a desarrollar una técnica denominada exploración con láser terrestre y que empleaba el mismo principio que los escáneres aerotransportados.

Una definición muy genérica de escáner láser es la que dieron Böhker y Marbs (Boehler and Marbs 2002) en el año 2002: *“láser escáner es cualquier dispositivo que registre coordenadas 3D de la superficie de un objeto, de manera automática, mediante un procedimiento sistemático y de alta frecuencia –es decir, un alto nº de registros- archivando los resultados en tiempo real”*.

Los escáneres, tanto los terrestres como los aéreos, permiten disponer de una gran cantidad de medidas tridimensionales de mucha precisión, en corto espacio de tiempo, habiendo evolucionado rápidamente en los últimos años, y siendo empleados cada vez con más frecuencia.

Los primeros escáneres láser –de corto alcance- estaban pensados para el diseño automatizado e industrial, sirviendo de ayuda a los programas de diseño asistido por ordenador. Como consecuencia de la constante evolución tecnológica, las aplicaciones de estos equipos fueron ampliándose y diversificándose, apareciendo los escáneres de medio alcance, especialmente diseñados para la industria petroquímica, debido a la complejidad de sus plantas y estructuras.

Poco a poco las ventajas del uso de este instrumental fueron extendiéndose a la arquitectura, el desarrollo urbanístico, la medicina forense, el patrimonio cultural, etc. En este último campo, alguna de sus utilidades son:

- Contribuir a un registro previo del elemento antes de su restauración.
- Contribuir al registro de zonas en peligro de desaparición, como puede ser el caso de un yacimiento arqueológico.
- Servir de base para la monitorización de elementos que estén dañados o puedan deteriorarse debido a condiciones adversas.
- Generar un modelo 3D para elaborar réplicas exactas.
- Generar modelos 3D que ayuden a la comprensión y entendimiento del elemento documentado. Generación de modelos virtuales, animaciones, etc. para museos o centros de interpretación.
- Ayudar a la identificación de características propias de una herramienta o periodo y que puedan haber pasados desapercibidas.
- Facilitar la realización de análisis espaciales.

Sin embargo, y pese a la gran variedad de aplicaciones de estos equipos, hay que tener presente que su precisión geométrica no es ilimitada y que su uso lleva implícito unos gastos y procedimientos.

### 5.3.1. Fundamentos de los escáneres terrestres

Las técnicas de medición se pueden clasificar en activas o pasivas, en función de si el instrumento de medida emite o no radiación. Así, las técnicas pasivas se encargarán de detectar la radiación ambiental reflejada – bien luz visible, o infrarrojo- mientras que las activas emitirán algún tipo de radiación controlada –luz, ultrasonidos o rayos X- para posteriormente detectar su reflexión y sondear algún objeto.

Los sistemas activos, al requerir para su funcionamiento un transmisor y un receptor láser, son bastante más complejos que los pasivos, pero sin embargo, al emitir ellos su propia radiación no requieren de luz ambiental. Los escáneres pertenecen a este grupo.

### 5.3.2. Instrumentación

Existe una gran variedad de escáneres activos diferenciándose entre ellos por la forma en la que el escáner recibe y/o analiza la señal de la radiación reflejada. Así se distingue entre escáneres de triangulación, de tiempo de vuelo o de diferencia de fase.

Los escáneres, además de clasificarse según el procedimiento de medida, pueden clasificarse en dinámicos o estáticos, según sea su posición durante la toma de datos. Los equipos dinámicos normalmente se suelen colocar sobre una plataforma móvil, y suelen venir acompañados de equipos GPS e INS, lo que hace que el sistema sea más completo, pero también más caro. Por el contrario, los equipos estáticos mantienen su posición durante el escaneo, proporcionando una alta densidad de puntos de mucha precisión. Este último es el que se viene utilizando en los levantamientos terrestres.



Figura 43. Aplicaciones del láser escáner en función del equipo empleado.

#### 5.3.2.1 Tipos de escáneres

Los escáneres de triangulación dirigen un patrón láser sobre el objeto y con una cámara se busca la localización de la proyección del mismo. El emisor láser y la cámara se instalan con un ángulo constante, creando un triángulo entre ellos y la proyección sobre el objeto.

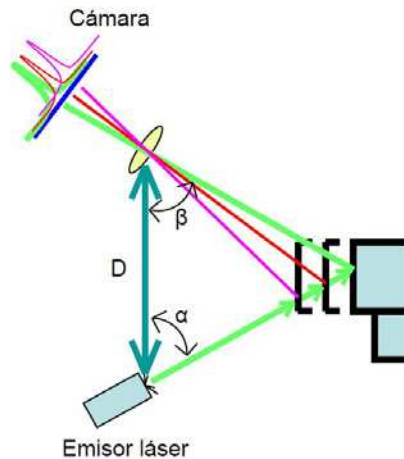


Figura 44. Escáner de triangulación: El lado  $D$  del triángulo –distancia sensor cámara– es conocido, así como el ángulo del emisor láser  $\alpha$ . El ángulo de la cámara puede ser determinado encontrando la localización del haz láser en el campo de visión de la cámara. Con estos tres elementos se determina perfectamente el triángulo, y proporcionan la profundidad exacta del objeto medido.

Cuanto mayor sea el lado  $D$ , menor será el error en la estimación de la profundidad del objeto. Sin embargo, esta base no puede ser muy grande porque entonces el emisor láser y la cámara tendrían un solape en el campo de visión muy reducido y la proyección del láser no siempre podría ser capturada por la cámara.

A causa de las limitaciones físicas para poder usar una base mayor y del reducido campo de visión en la cámara, los escáneres de triangulación se usan en aplicaciones que requieran normalmente una distancia inferior a 10 metros, alcanzando con estos equipos precisiones muy altas, del orden de micras.

Cuando se pretende registrar la totalidad del objeto, en vez de mover el emisor láser, una opción es proyectar patrones de puntos o líneas que cubran todo el objeto a la vez. Estos patrones pueden ir desde líneas regulares hasta patrones especialmente codificados que modulan su frecuencia o su fase en el tiempo para proporcionar una mejor precisión. Es posible incluso el uso de patrones mucho más complejos basados en el efecto Moiré<sup>26</sup>, para aumentar la precisión y robustez de los sistemas.

<sup>26</sup> El efecto Moiré se produce como resultado de interactuar juntas dos señales con amplitud modulada.

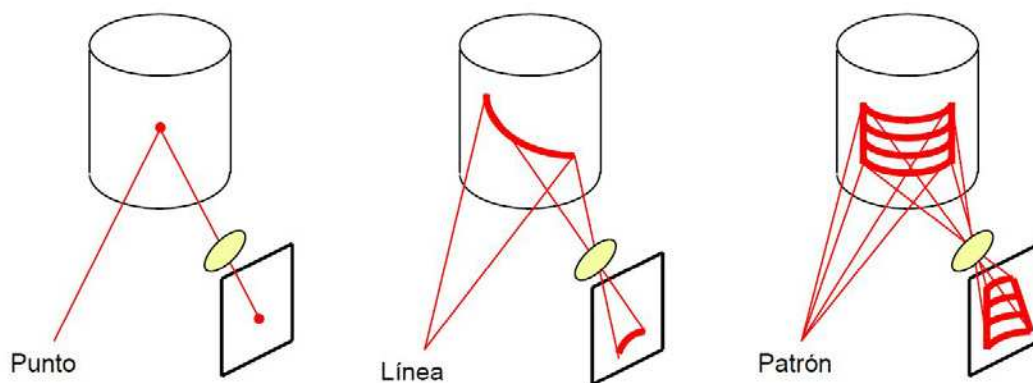


Figura 4.5. Diferentes técnicas empleadas en los escáneres de triangulación.

En otras ocasiones, el objeto que se pretende escanear se coloca sobre una plataforma giratoria de tal forma que el escaner permanezca siempre en la misma posición registrando los datos.

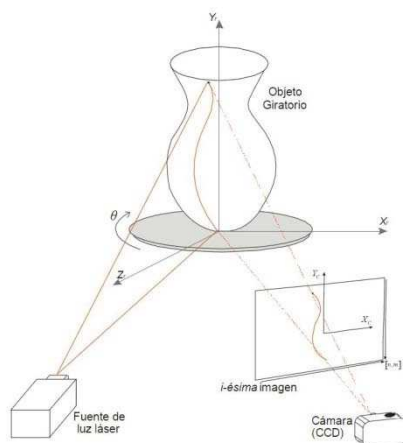


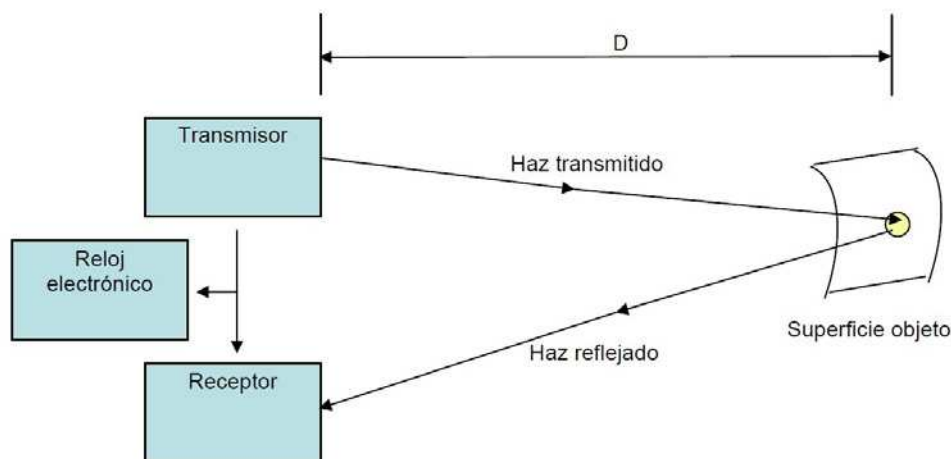
Figura 4.6. Ejemplo de adquisición de datos con un escáner de triangulación en el que se ha colocado el objeto sobre una plataforma giratoria.

Existe un segundo grupo de escáneres, y son aquellos escáneres activos que miden un intervalo de tiempo, existiendo dos principios de medida: los basados en pulsos (tiempo de vuelo) o los basados en fase.

#### Los escáneres de tiempo de vuelo o basados en pulsos

Conociendo la velocidad de propagación de la luz a través de los medios, y si sabemos el tiempo que tarda ésta en hacer un recorrido de ida y vuelta, la distancia entre el emisor de luz y el reflector será  $D=ct/2$ , siendo  $c$  la velocidad de la luz en el aire, y  $t$  el tiempo que tarda la señal en ir y volver. A la conocida velocidad de propagación de la luz en el vacío, habrá que aplicarle el correspondiente índice de refracción en función del medio en el que se encuentre.

Los escáneres de tiempo de vuelo no suelen usar haces continuos si no que emiten pulsos de láser. Son capaces de escanear todo su campo de visión cambiando la dirección del haz, valiéndose para ello de una unidad de desviación.



*Figura 47. Principio de un láser escáner basado en el tiempo de vuelo.*

Para que no se produzcan mediciones ambiguas, el tiempo medido debe ser mayor que la amplitud del pulso. En este tipo de equipos, la precisión viene determinada por el mecanismo del reloj, siendo prácticamente independiente de la distancia a la que se trabaje.

El método derivado del tiempo para medir el retorno del pulso depende de la resolución temporal deseada, de la resolución del reloj y del rango dinámico requerido del pulso. Normalmente algunos principios para clasificar el diseño, son el tiempo límite, el tiempo de paso cero, el tiempo del primer momento y la constante de fracción de tiempo.

En un sistema de tiempo de vuelo, la máxima frecuencia de pulso está determinada por el hecho de que el emisor no puede enviar un pulso hasta que no haya recogido el anterior. La finalidad de esta restricción es evitar la confusión en la llegada de los pulsos, lo que recibe el nombre de máximo rango de certeza, y depende de la duración del pulso y de su frecuencia.

La precisión de un sistema de medida por pulsos viene determinada por:

- La capacidad de seleccionar la misma posición relativa en el pulso emitido y recibido para medir el intervalo de tiempo. Esto está limitado por el ruido, la fluctuación, la fuerza de la señal, la sensibilidad del detector, y la brevedad y capacidad de reproducción del emisor del pulso.
- La precisión con la que se fija un lapso de tiempo.
- La precisión del instrumental en la medida de los lapsos de tiempo.

La ventaja de usar un sistema de pulsos para las mediciones láser de distancia es la alta concentración de la energía transmitida. Esta energía hace posible que se alcance el ratio señal-ruido necesario para altas precisiones en mediciones de largas distancias. El inconveniente es el problema de detectar la llegada exacta de los retornos dispersos del pulso debido a la naturaleza cambiante de las tolerancias ópticas y la atenuación atmosférica.

Como se ha comentado al principio del texto, el haz láser ha de ser desviado para poder registrar múltiples puntos, para lo cual era necesario una unidad de desviación. La mayoría de estas unidades hacen uso de un espejo ya que éste puede rotar con rapidez y precisión.

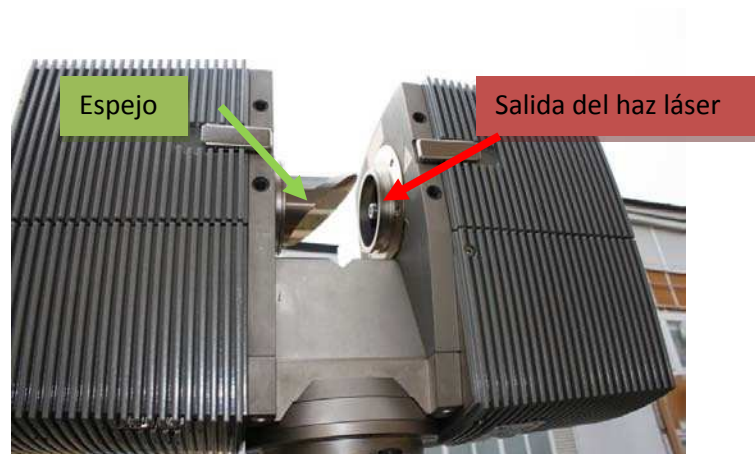


Figura 48. Detalle del espejo que actúa como unidad de desviación del haz láser. Escáner FARO.

Una opción es emplear un espejo oscilante que permite el movimiento del láser a lo largo de una línea; la combinación de dos espejos permite la desviación del haz en dos direcciones. Para aumentar la velocidad de la unidad de desviación y reducir la complejidad de hacer girar un espejo y después volverlo atrás, la opción es un prisma óptico reflectante que vaya rotando. Una última modificación a este sistema se obtiene añadiendo fibra para que el sistema sea más flexible. Esta última opción presenta la ventaja de que la proporción de pulsos láser no está vinculada al ángulo de vista. Además, es posible obtener un patrón de escaneado muy denso y regular, no siendo necesaria la calibración del equipo tras el ajuste en fábrica.

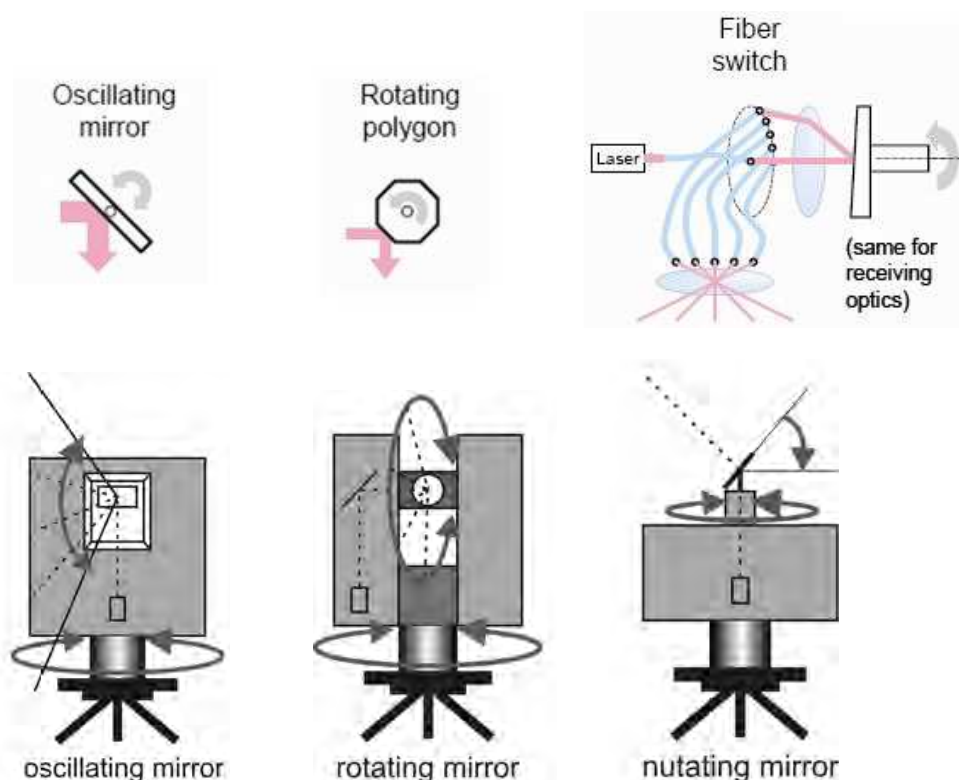


Figura 49. Modos de desviación del haz láser.

### Escáneres de diferencia de fase

Este tipo de medición basado en el tiempo evita el uso de relojes de alta precisión. La luz emitida se modula en amplitud y se envía a una superficie. La reflexión dispersa se captura y un circuito mide la diferencia de fase entre las ondas enviadas y recibidas, y por tanto la demora.

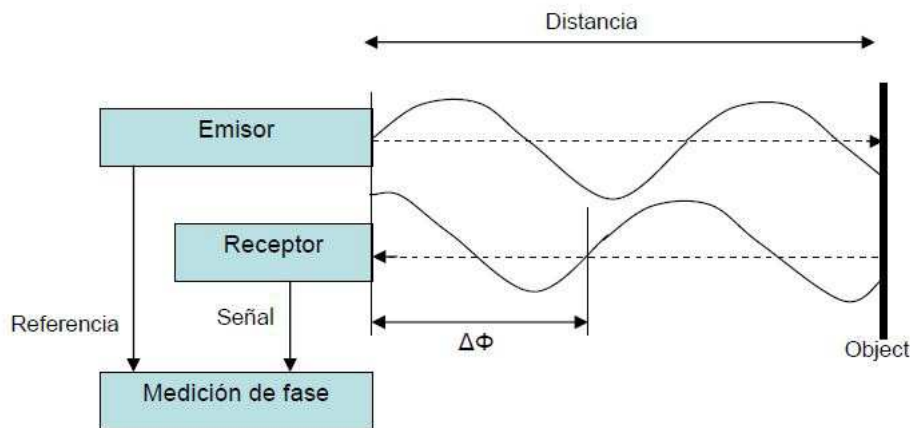


Figura 50. Principio de medición basado en la diferencia de fase.

Los escáneres basados en la diferencia de fase típicos, modulan su señal utilizando modulaciones sinusoidales, amplitud modulada, frecuencia modulada, pseudo ruido o modulación polarizada.

En estos equipos la distancia del escáner al objeto viene dada por la siguiente fórmula:

$$D = \frac{ct}{2} = \frac{c}{4\pi f_{modulada}} \Delta\phi$$

Estos escáneres de modulación continua también tienen un máximo rango de certeza. El alcance en estos equipos está limitado al que corresponde a un retardo de fase de un ciclo de la onda sinusoidal. Para evitar el inconveniente de un intervalo de ambigüedad en la medición, se pueden utilizar varias frecuencias de manera que con las más bajas –las que mayor longitud de onda tienen– se localiza el punto a medir, y con las altas frecuencias se mide la distancia con precisión. La longitud de onda larga define la distancia unicidad y la longitud de onda corta define la precisión que puede obtenerse.

La precisión de un escáner de estas características vendrá limitada por:

- La frecuencia de la señal.
- La precisión en el ciclo de medición de la fase.
- La estabilidad del oscilador de modulación.
- Las turbulencias en el aire por el que se realiza la medición.
- Las variaciones en el índice de refracción del aire.



Existe un cuarto grupo de escáneres, que son los escáneres aerotransportados<sup>27</sup> también denominados sistemas LiDAR, cada vez más utilizados en trabajos de prospección arqueológica y que proporcionan datos de sitios donde la fotogrametría o la teledetección no son capaces de llegar, ya que se quedan únicamente en la parte más superficial. Estos equipos han de ir acompañados de sistemas GPS/INS para la georeferenciación de los datos obtenidos.

Desde el año 2004 han aparecido una nueva generación de sistemas LiDAR que son los denominados *full-waveform* (FWF) que permiten el análisis completo de cada pulso hasta su llegada al suelo. Esto resulta muy útil en la realización de batimetrías, estudios forestales, generación de modelos urbanos, y en estudios arqueológicos.

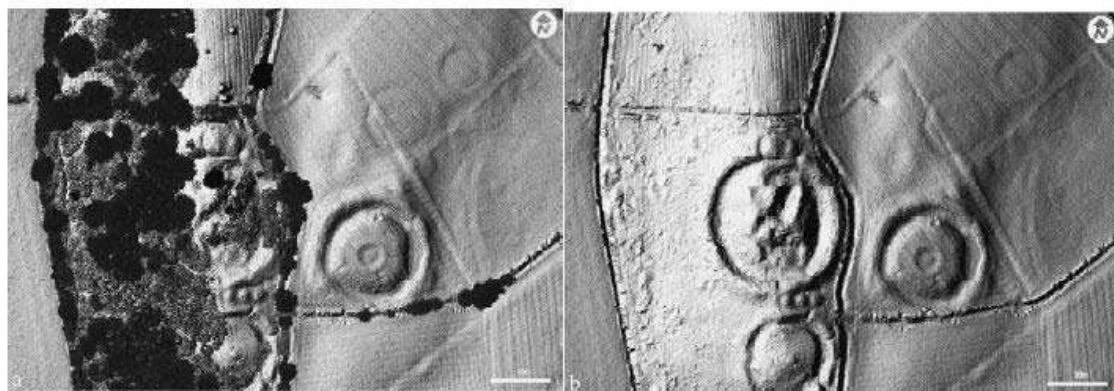


Figura 51. Ejemplo de las ventajas que puede aportar la documentación de yacimientos mediante LiDAR frente a otras técnicas. Una vez se han registrado los puntos, y tras un proceso de filtrado, es posible clasificarlos, de tal forma que se descarten aquellos definidos como vegetación. Dicha eliminación deja a la vista posibles restos arqueológicos.

<sup>27</sup> Estos escáneres utilizan los sistemas de medida anteriormente explicados: tiempo de vuelo (*ToF-Time of Flight*) o Diferencia de fase (*CW-Continuous Wave*).

TIPO DE ESCÁNER	FOTOGRAFÍAS (Modelos disponibles en junio 2011)			
Escáneres de triangulación y luz estructurada				
Escáneres de tiempo de vuelo				
Escáneres de diferencia de fase				

Tabla 8. Fotografías de algunos de los escáneres más utilizados clasificados según su sistema de medida.

FABRICANTE Y MODELO	TIPO DE MEDIDA	ALCANCE MÁXIMO	PRECISIÓN		ÁNGULO H/V	VELOCIDAD MAX. ptos/seg	CAMPO VISUAL	TEMPERATURA
			POSICIÓN	DISTANCIA				
<b>MINOLTA</b> Range 7	Triangulación	0.80 m	40µm					+10°C/+40°C
<b>MINOLTA</b> VI-9i	Triangulación							
<b>BREUCKMANN</b> naviSCAN	Luz estructurada	10-30 m	5-100µm	0.030 mm	0.0012"	---	38°/32°	+0°C/+40°C
<b>OPTECH</b> ILRIS-3D	Tiempo de vuelo	1200 m (80%) 400 m (10%)	---	7mm (100 m)	50 <sup>cc</sup>	2.500-3.500	40°/40°	+0°C/+40°C
<b>OPTECH</b> ILRIS-3D-ER	Tiempo de vuelo	1700 m (80%) 650 m (10%)	---	7mm (100 m)	50 <sup>cc</sup>	2.500-3.500	40°/40°	+0°C/+40°C
<b>OPTECH</b> ILRIS-HD	Tiempo de vuelo	1250 m (80%) 400 m (10%)	---	4mm (100 m)	50 <sup>cc</sup>	10.000	40°/40°	+0°C/+40°C
<b>OPTECH</b> ILRIS-HD-ER	Tiempo de vuelo	1800 m (80%) 650 m (10%)	---	4mm (100 m)	50 <sup>cc</sup>	10.000	40°/40°	+0°C/+40°C
<b>OPTECH</b> ILRIS-LR	Tiempo de vuelo	3000 m (80%) 1330 m (10%)	---	4mm (100 m)	50 <sup>cc</sup>	10.000	40°/40°	+0°C/+40°C
<b>RIELG</b> LMS-Z620	Tiempo de vuelo	2000 m (80%) 750 m (10%)	10 mm	---	---	8.000 11.000	360°/80°	+0°C/+40°C
<b>RIELG</b> LMS-Z420i	Tiempo de vuelo	1000 m (80%) 350 m (10%)	10 mm	---	---	8.000 11.000	360°/80°	+0°C/+40°C
<b>RIELG</b> LMS-Z390i	Tiempo de vuelo	400 m (80%) 140 m (10%)	6 mm	---	---	8.000 11.000	360°/80°	+0°C/+40°C
<b>RIELG</b> VZ-1000	Tiempo de vuelo	450-1400 m (90%) 350-700 m (20%)	8 mm	---	---	122.000	360°/100°	+0°C/+40°C
<b>RIELG</b> VZ-400	Tiempo de vuelo	350-600 m (90%) 160-280 m (20%)	5 mm	---	---	122.000	360°/100°	+0°C/+40°C
<b>TRIMBLE</b>	Tiempo de	31 m	---	1 mm (90% 15m)		175.000	360°/270°	+5°C/+45°C

<b>FX</b>	vuelo							
<b>TRIMBLE</b> GX	Tiempo de vuelo	350 m (90%) 155 m (18%)	12 mm(99% 100m)	7 mm (99% 100m)	38 <sup>cc</sup> /45 <sup>cc</sup>	5.000	360°/60°	+0°C/+40°C
<b>TRIMBLE</b> CX	Diferencia de fase	80 m (90%) 50 m (18%)	4.5 mm (30m) 7.3 mm (50m)	1.2 mm (30m) 2 mm (50m)	45 <sup>cc</sup> /75 <sup>cc</sup>	54.000	360°/300°	+0°C/+40°C
<b>LEICA</b> HDS 3000	Tiempo de vuelo	100 m	6 mm	4 mm	38 <sup>cc</sup>	1.800	360°/270°	+0°C/+40°C
<b>LEICA</b> HDS 6100	Diferencia de fase	79 m (90%) 50 m (18%)	5 mm (25m) 9 mm (50m)	2 mm (90% 25 m) 3 mm (90% 50m)	80 <sup>cc</sup>	508.000	360°/310°	-10°C/+45°C
<b>LEICA</b> ScanStation 2	Tiempo de vuelo	300 m (90%) 134 m (18%)	6 mm (50m)	4 mm (50m)	38 <sup>cc</sup>	50.000	360°/270°	+0°C/+40°C
<b>LEICA</b> ScanStation C10	Tiempo de vuelo	300 m (90%) 134 m (18%)	6 mm (50m)	4 mm (50m)	38 <sup>cc</sup>	50.000	360°/270°	+0°C/+40°C
<b>FARO</b> LS880	Diferencia de fase	76 m	---	2.6 mm (90% 10m) 4.2 mm (90% 25m)	100 <sup>cc</sup>	120.000	360°/320°	+5°C/+40°C
<b>FARO</b> PHOTON 120	Diferencia de fase	120 m (90%)	---	0.8 mm (90% 10m) 1.0 mm (90%25m)	100 <sup>cc</sup>	122.000 976.000	360°/320°	+5°C/+40°C
<b>FARO</b> FOCUS 3D	Diferencia de fase	120 m (90%)		2 mm (25 m 90%)		122.000 976.000	360°/305°	+5°C/+40°C
<b>TOPCON</b> GLS-1500	Tiempo de vuelo	330 m (90%) 150 m (18%)	---	4 mm (150m)	6"	30.000	360°/70°	+0°C/+40°C
<b>Z+I</b> IMAGER 5006i	Diferencia de fase	50m	---	0.7 mm(100% 25m) 1.8 mm(100% 50m)	78cc	15.466	360°/310°	-10°C/+45°C

Tabla 9. Especificaciones técnicas de algunos modelos de escáneres.

El alcance depende del nivel de reflectividad del objeto y algunas marcas lo expresan en función de ello. Las precisiones dependen también del nivel de reflectividad y de la distancia.

### 5.3.2.2. Calibración de los equipos

La calibración de un escáner refleja la relación existente entre las observaciones realizadas por el instrumento (distancia, ángulo horizontal y ángulo vertical) y los errores instrumentales sistemáticos.

Las primeras consideraciones acerca de la calibración de los escáneres láser terrestres fueron realizadas prácticamente desde la aparición de estos equipos (Lichti 2000), incluyéndose en un primer momento dentro del apartado de la metrología geodésica. Entre los años 2000 y 2007 se publicó, dividida en 8 partes, la norma ISO 17123<sup>28</sup> -*Field procedures for testing geodetic and surveying instruments* (Gottwald 2008), tal y como se puede apreciar en la siguiente figura, y que regula los estándares para la calibración de los distintos equipos de medida (topográficos y geodésicos).

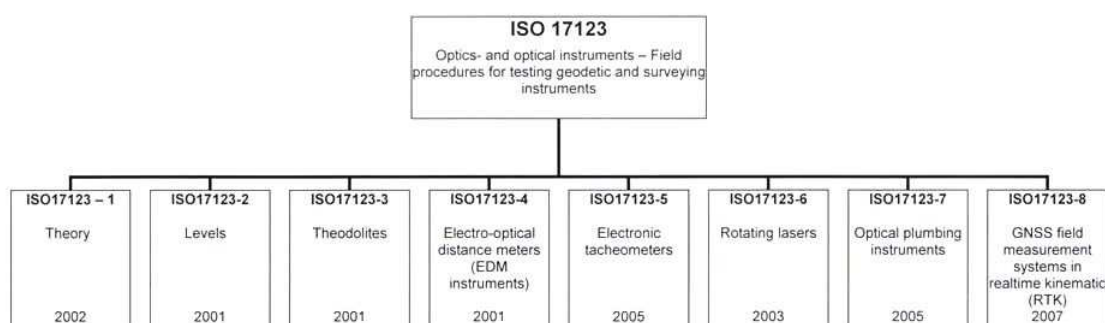


Figura 52. Estructura de la norma ISO 17123

En la mayoría de estudios realizados sobre calibración de escáneres terrestres, se ha considerado que el método de la autocalibración era el procedimiento más eficaz (Luis Ruiz 2010).

Para llevar a cabo este proceso se hace necesario disponer de un laboratorio de medición 3D que contenga un campo de calibración fotogramétrica y un número suficiente de puntos de control en un determinado sistema de referencia y con la suficiente precisión como para poder contrastarlos con los valores observados. El número de puntos no ha de bajar de 20, y han de estar distribuidos uniformemente por el laboratorio garantizándose su perdurabilidad. La posición de dichos puntos se debe determinar mediante una estación topográfica, estando las desviaciones estándar de las coordenadas ajustadas por debajo del medio milímetro para cada coordenada (Luis Ruiz 2010).

28

<http://www.iso.org/iso/search.htm?qt=17123&searchSubmit=Search&sort=rel&type=simple&published=on>



Figura 53. Laboratorio de calibración.

Mediante este método se estiman simultáneamente los parámetros externos de la orientación del escáner con respecto al sistema de coordenadas elegido, y los errores instrumentales sistemáticos o parámetros de calibración. El proceso consta de los siguientes pasos:

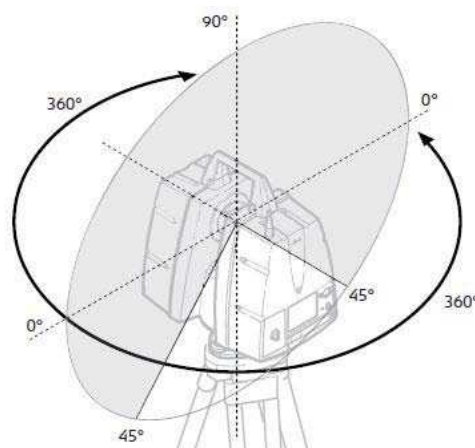
- i. Disponer de las medidas de los puntos de control dispuestos en el laboratorio.
- ii. Analizando el diseño y tolerancias de fabricación del sensor, crear un modelo analítico de los errores instrumentales.
- iii. Identificar los parámetros de calibración desconocidos usando un algoritmo especialmente diseñado para esto.
- iv. Utilizar el modelo desarrollado en la calibración para corregir los datos del escáner. Los resultados obtenidos después de la corrección pueden ayudar a verificar el modelo y a encontrar errores adicionales no considerados anteriormente.

Para llevar a cabo el proceso de calibración es necesario tomar medidas con el escáner desde distintas posiciones y con diversos ángulos de incidencia, conociendo la posición del centro del escáner con la mayor precisión posible.

Tanto los parámetros externos de la orientación del escáner, como los parámetros de transformación entre las coordenadas de los puntos obtenidas por el escáner y el sistema de referencia externo, se calculan mediante una transformación Helmert 3D de 6 parámetros (3 traslaciones y 3 rotaciones) en la que la escala no se estima por tratarse de distancias cortas dentro del propio laboratorio.

El punto de partida consiste en asumir que los errores instrumentales de los escáneres son similares a los de una estación robotizada, es decir, el error cero, el error de colimación y los errores de los ejes horizontal y vertical.

- Eje vertical: permite al escáner mover el haz en forma horizontal. Según de qué tipo de escáner se trate, este eje es el eje de rotación de la cabeza del escáner, o el eje ortogonal a los ejes de oscilación de los espejos.
- Eje de colimación: pasa por el centro del espejo de escaneado y el centro de la huella del láser sobre la superficie del objeto escaneado.
- Eje horizontal: es el eje de rotación del espejo de escaneado.



*Figura 54. Campo de visión y ejes del escáner C10 de Leica.*

En la autocalibración también se estiman la precisión y la exactitud de las coordenadas medidas por los escáneres, pero únicamente es posible determinar este parámetro para los puntos de control existentes en el laboratorio.

Además de las calibraciones en laboratorio, en ocasiones el usuario puede necesitar tener que calibrar el equipo antes de cada sesión de trabajo. Para ello se desarrollan dos procedimientos extensamente explicados en (Luis Ruiz 2010):

- Calibración del error vertical de la escala
- Calibración del error cero en el telémetro del láser

### 5.3.3. Adquisición de los datos

La adquisición de datos mediante láser escáner, es un proceso aparentemente sencillo que permite disponer, en apenas unos pocos minutos, de un completo modelo 3D. Sin embargo, detrás de esos millones de puntos coloreados, hay un trabajo previo de planificación y organización que hace posible que ese modelo se convierta en un documento válido y preciso de trabajo.

Es importante tener claro desde el comienzo del proyecto el nivel de detalle que se necesita, ya que esto nos condicionará en gran medida la elección del método a emplear, así como los productos generados a partir de la nube de puntos. Al realizar un trabajo mediante láser escáner, éste no se queda en la toma de datos en campo, sino que va más allá, necesitando en muchas ocasiones la realización de trabajos topográficos que complementen el levantamiento.

En la medida que sea posible, es recomendable seguir protocolos establecidos por organismos de demostrada reputación<sup>29</sup>, tanto para llevar a cabo las distintas fases, como para decidir la manera más adecuada de almacenar tal cantidad de datos, o incluso para establecer unas exigencias métricas al trabajo final.

<sup>29</sup> English Heritage (<http://www.english-heritage.org.uk/>); CyARK (<http://archive.cyark.org/>); Archaeology Data Service (<http://archaeologydataservice.ac.uk/>).



### 5.3.3.1. Consideraciones previas

La elección del escáner es la primera decisión que hay que tomar, muy condicionada al tipo de elemento que se quiera documentar, ya que las necesidades de precisión y alcance pueden variar considerablemente según se trate de una talla arquitectónica o un templo. Como en la mayoría de las técnicas que hemos comentado, un buen conocimiento del funcionamiento del equipo es imprescindible así como una visión objetiva y clara de los resultados que se quieren obtener.

SISTEMA DE MEDIDA		PRECISIÓN	ALCANCE	USO
Triangulación	Rotación	50 micras	0.1-1 m	Escaneo de pequeños objetos que pueden ser movidos de su sitio. Útil para la realización de réplicas.
	Brazo articulado	50 micras	0.1-1 m	Escaneo de pequeños objetos. Se pueden utilizar en cualquier sitio. Útil para la realización de réplicas.
	Espejo-prisma	Sub-mm	0.1-25m	Escaneos de pequeños objetos in situ. Útil para la realización de réplicas.
Diferencia de fase		3-6 mm@100m	2-300m	Válidos para el levantamiento de fachadas e interiores en los que se requiere una delineación con datos auxiliares.
Tiempo de vuelo		5mm@2m	2-1500m	
Láser aerotransportado		0.15m	10-3500m	Prospecciones.

Tabla 10. Precisión, uso (dentro del campo patrimonial) y alcance de los distintos tipos de escáneres del mercado.

En cuanto a la precisión requerida, el *English Heritage* -organismo británico que se encarga de la protección y puesta en valor del patrimonio inglés- publicó en 2009 sus estándares sobre la documentación geométrica del patrimonio<sup>30</sup>, y en ella contempla los errores máximos estimados en función de la escala para levantamientos de nubes de puntos.

ESCALA DE TRABAJO <sup>31</sup>	PRECISIÓN ACEPTABLE	DENSIDAD DE PUNTOS	APLICACIÓN
1/10	+/- 5 mm	1 mm	Pequeños objetos (5x5m)
1/20	+/- 6 mm	3 mm	Objetos grandes (10x10m)
1/50	+/- 15 mm	5 mm	Pequeñas estructuras (20x30m)
1/100	+/- 30 mm	15 mm	Grandes estructuras (40x60m)

Tabla 11. Precisiones aceptables según la escala de trabajo para el *English Heritage*. El 67% de la muestra debe entrar en las tolerancias indicadas y el 90% no pueden superar la tolerancia en 1,65

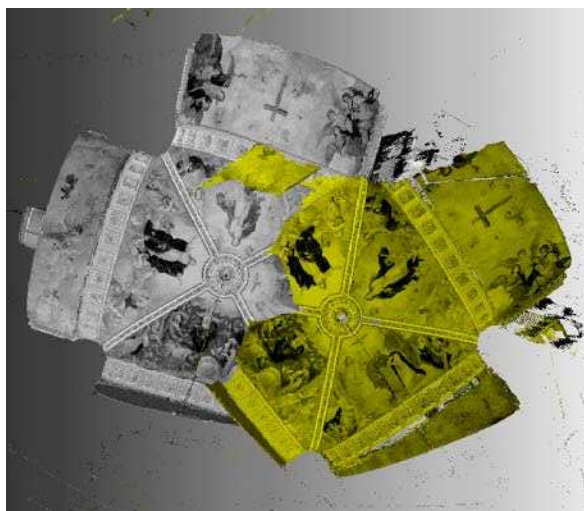
<sup>30</sup> El *English Heritage*, dispone de la publicación titulada "*Metric Survey Specification*" (Bryan and Bedford 2009) donde se establecen los requisitos de precisión para levantamientos realizados con distintas metodologías, siendo una de ellas el levantamiento mediante escáner.

<sup>31</sup> A pesar de que hoy en día no tiene demasiado significado hablar de escala – ya que las entregas de los proyectos se suelen hacer en formato digital- el concepto de escala sigue utilizándose como indicativo de la exactitud, constituyendo un dato importante para el usuario final de la información. (Barber, *et al.* 2003).

*veces. No aclara si se refiere a tolerancias absolutas respecto al sistema de coordenadas global o a tolerancias relativas respecto al marco del levantamiento.*

---

Generalmente y cuando hablamos de patrimonio construido, los objetos que requieren documentación suelen tener un tamaño lo suficientemente grande como para no poder ser escaneados de una sola toma. Por este motivo, la obtención del modelo 3D completo requerirá de varios estacionamientos, que posteriormente será necesario unir en la fase de laboratorio.



---

Figura 55. Distribución de dos escaneos de una misma habitación desde dos puntos de vista distintos

---

Existen diversas maneras de proceder, pero sin duda una de las más efectivas (English Heritage 2007) consiste en colocar –antes de comenzar los escaneos- varias señales de referencia distribuidas por toda la zona de trabajo. En general, la unión de las nubes de puntos se realizará mediante un Hermert 3D, por lo que será suficiente con disponer de 4 señales comunes a cada dos escaneos (Barber, *et al.* 2003) -siempre y cuando no estén alineadas- y en la medida que sea posible, se procurará disponerlas a distintas alturas.



---

Figura 56. Proceso de distribución de señales de referencia a distintas alturas antes de comenzar el escaneo.

---

Actualmente, hay una gran variedad de señales disponibles: retroreflectantes, esféricas, de papel, prismas,...Las distintas casas comerciales proporcionan estas dianas que están diseñadas de forma que reflejen la mayor parte del haz láser. El escáner podrá detectarlas, y tras un escaneo de mayor resolución detectará de manera automática el centro de las mismas.

Algunas de las dianas existentes en el mercado son las que se aprecian en la figura 58:



Figura 57. Tipos de dianas artificiales.

Si además el levantamiento debe estar en un sistema de referencia determinado, será necesario medir el centro de las dianas mediante una estación total, habiendo observado y calculado previamente las coordenadas de las bases topográficas necesarias para cubrir todo el edificio.

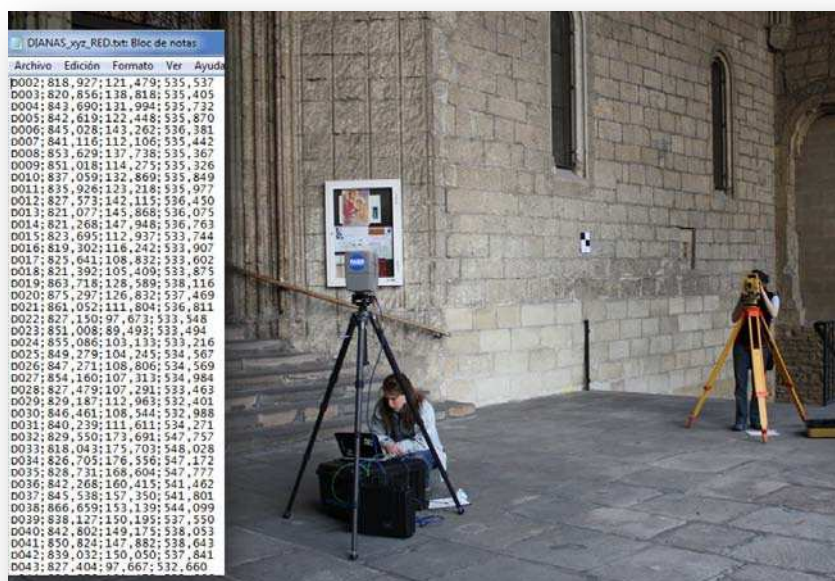


Figura 58. Registro de las coordenadas de las dianas con estación total a medida que se va avanzando con el escaneo.

Existen hoy en día escáneres que hacen también las funciones de estaciones totales, pudiéndose estacionar y orientar en puntos de coordenadas conocidas. El empleo de estos equipos evitaría el apoyo topográfico con la estación.

Tal y como hemos comentado anteriormente, para registrar completamente un edificio hará falta estacionar el escáner varias veces, de forma que no queden zonas vacías. Una buena planificación de las tomas evitará este problema y el tener que volver al lugar. Las posiciones óptimas para el estacionamiento del escáner de deben elegir de manera que garanticen la máxima cobertura y precisión y al mismo tiempo se minimice el número de inicializaciones.

La precisión de la medición depende del diámetro de la huella láser, siendo el ángulo de incidencia y el alcance fundamentales para determinar la posición del escáner. En (Kopácyk and Korbasove 2004) se puede ver un minucioso análisis que determina la configuración óptima del escáner para alcanzar la precisión requerida.

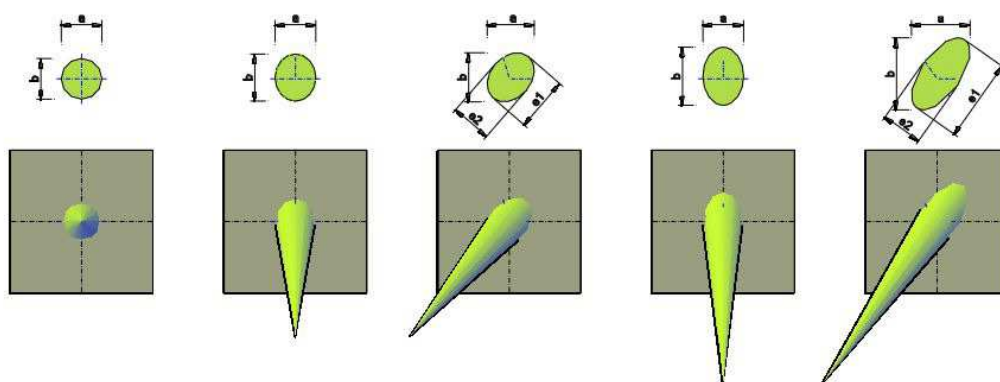


Figura 59. Huellas del láser según el ángulo de escaneo.

La mayor parte de los escáneres actuales, tienen un campo de visión de 360º en sentido horizontal y entre 270º y 320º en sentido vertical. En ocasiones no es necesario el registro de una zona tan amplia, por lo que se define un área de escaneo, minimizándose de esta manera el tiempo y el tamaño del fichero. La realización de fotografías de alta resolución del elemento documentado desde el propio escáner es opcional, ya que su obtención supone un incremento de tiempo y está condicionada a los objetivos iniciales del proyecto. Hay equipos que llevan integrada la cámara, y en otros ésta es externa.

Un último aspecto por analizar es la resolución de escaneo, es decir, la distancia entre puntos tanto en sentido vertical como horizontal, que vendrá normalmente marcada por la resolución angular<sup>32</sup> del instrumento de medida. El incremento o disminución de este valor influye en el tiempo de escaneo y lógicamente en el tamaño del fichero generado, tal y como se aprecia en la siguiente tabla:

RESOLUCIÓN DE ESCaneo	TIEMPO DE ESCaneo (horas)	SEPARACIÓN(mm) ENTRE PUNTOS PARA D=25m	Nº PUNTOS TOTALES	TAMAÑO (Mb) DEL FICHERO SIN FOTOGRAFÍAS
1/1	01:49:12	3	160.000.000	320
1/4	00:06:49	12	41.400.000	79
1/8	00:01:42	24	10.350.000	35
1/32	00:00:25	96	675.000	18

Tabla 12. Ejemplos de distintas resoluciones para el escáner FARO LS880.

<sup>32</sup> La separación entre puntos será la longitud de un arco de circunferencia de radio D (distancia escáner-objeto) y ángulo  $\theta$  (resolución angular del instrumento).

No es razonable explorar los objetos con una resolución más alta que el diámetro del propio punto láser en la superficie; en un determinado momento la densidad del muestreo no mejora perceptiblemente la exactitud de los datos sino que simplemente aumenta el volumen de los mismos (Luis Ruiz 2010). La reducción de la distancia al objeto de estudio es una solución a esta inversión de tiempo.

La elección de la densidad de puntos depende de muchos factores, pero un dato que influye de gran manera, es el tamaño que tendrá el objeto más pequeño que se quiera representar. Una forma de evaluar las posibilidades de que ese objeto se vea en el barrido vendrá dado por la siguiente expresión:  $Q = 1 - \frac{m}{\lambda}$ , donde  $Q$  indica el grado de éxito de las medidas,  $m$  es la distancia entre puntos y  $\lambda$  es el tamaño mínimo del objeto que se quiera representar (Bryan 2006).

TAMAÑO DEL OBJETO MÁS PEQUEÑO QUE SE QUIERA REPRESENTAR	DENSIDAD DE ESCANEOS PARA UN ÉXITO DEL 50%	DENSIDAD DE ESCANEOS PARA UN ÉXITO DEL 80%
1 mm	0.5 mm	0.2 mm
10 mm	5 mm	2 mm
20 mm	10 mm	4 mm

Tabla 13. Densidad de escaneo en función del objeto más pequeño a documentar.

Como norma general (Bryan and Bedford 2009) se aplica que la densidad de la nube de puntos ha de ser como mínimo la mitad del objeto más pequeño que se desee registrar.

No se debe olvidar que estos equipos trabajan con luz láser –más o menos perjudicial a la salud según la clasificación establecida en 4.4.3.-, con lo que habrá que establecer las precauciones y procedimientos necesarios. Por ello:

- El equipo habrá de ser empleado únicamente por personal cualificado y formado.
- Las zonas en donde se vaya a trabajar deberán ser señalizadas con la indicación de advertencia correspondiente.
- Habrá que tomar las medidas necesarias para evitar que el personal mire directamente al rayo láser.
- Intentar que el haz láser no sea dirigido hacia superficies especulares intencionadamente.
- Guardar el equipo cuando éste no vaya a ser utilizado en lugares donde solo el personal autorizado tenga acceso y que sean seguros, estando a salvo de explosiones u otros peligros.

### 5.3.3.2. Errores que afectan a la toma de datos

Normalmente antes de comenzar a trabajar con un escáner, éste habrá sido calibrado en fábrica, tal y como se vio en el apartado 5.3.2.2. Sin embargo, por muy precisa que sea esta calibración, seguirán existiendo errores producidos por la metodología empleada, el cuidado y mantenimiento que se haga de los equipos, o incluso causados por las condiciones climáticas en las que se trabaje. Así lo afirmaban en 2003 (Boehler and Marbs 2003) (Boehler and Marbs



2002; Boehler and Marbs 2003): *“Las especificaciones de precisión, proporcionadas por los fabricantes de escáneres en sus publicaciones, no son comparables con la realidad. La experiencia nos muestra que a veces estas precisiones no están contrastadas y que la precisión de estos instrumentos, que son contruidos en pequeñas series, varía de un instrumento a otro y depende de la calibración individual y del cuidado que se haya tenido en su manejo desde entonces”*.

No hay una única clasificación de aquellas fuentes de error que influyen en la toma de datos, ya que intervienen múltiples variables, y no todos los escáneres funcionan de modo similar. Staiger (Staiger 2005), propuso una que incluía 4 posibles causas de error: los errores instrumentales, los debidos a la propia superficie del objeto medido, los causados por las condiciones climatológicas, y los errores metodológicos. En la tesis doctoral de Reshetyuk (Reshetyuk 2006) se puede consultar una completa descripción de cada uno de ellos.

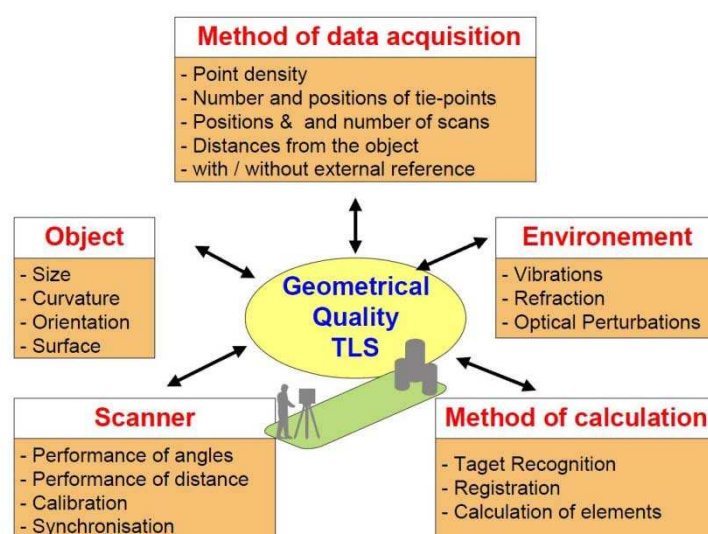


Figura 60. Fuentes de error en la medida con láser escáner.

### Errores instrumentales

Los errores instrumentales pueden ser accidentales o sistemáticos y son debidos fundamentalmente al diseño del escáner. Los errores aleatorios afectan principalmente a la precisión de la medida y en los equipos de tiempo de vuelo por pulsos, afecta a la localización del ángulo. Los errores sistemáticos pueden ser generados por la no linealidad de la unidad de medición de tiempo, o por la deriva de temperatura en la electrónica.

La divergencia del haz es la anchura que alcanza el haz con la distancia recorrida y tiene una fuerte influencia en la resolución de la nube, así como en la ambigüedad en la posición del punto. La aparente localización del punto observado está en la línea central del haz emitido. Sin embargo, la localización real está en algún lugar de la huella del haz proyectada, siendo esta ambigüedad aproximadamente igual a un cuarto del diámetro del haz láser (Lichti and Gordon 2004).

Una de las consecuencias de esta divergencia es el borde partido. Cuando el haz choca con el borde de un objeto, se divide en dos partes, reflejándose cada una de las partes en distintas superficies, con lo que al escáner llegan dos señales de un mismo punto del espacio, con el consiguiente error de posición.

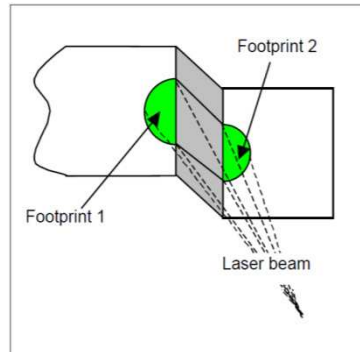


Figura 61. Puntos fugados en la medida con el láser escáner.

Las ambigüedades en la determinación de la distancia se pueden determinar para cada tipo de escáner según las fórmulas siguientes:

Escáner de triangulación	$\delta_z \approx \frac{Z^2}{fD} \delta_p$	<p><math>f</math> es la posición efectiva de la huella del láser</p> <p><math>D</math> es la distancia de la triangulación</p> <p><math>\delta_p</math> es la ambigüedad en la posición láser</p> <p><math>Z</math> es la distancia a la superficie</p>
Escáner de diferencia de fase	$\delta_z \approx \frac{\lambda_m}{4\pi\sqrt{SNR}}$	<p><math>\lambda_m</math> es la longitud de onda modulada</p> <p><math>SNR</math> es la razón señal-ruido</p>
Escáner de tiempo de vuelo	$\delta_z \approx \frac{cT_t}{2\sqrt{SNR}}$	<p><math>T_t</math> es el tiempo de lanzamiento del pulso</p> <p><math>SNR</math> es la razón señal-ruido</p>

La mayoría de los escáneres láser emplean espejos rotatorios para desviar la señal hacia todas las direcciones. Una pequeña diferencia angular puede provocar un error considerable en coordenadas cuando la distancia al escáner aumenta. La precisión angular depende de cualquier error en la posición de los espejos y la precisión en la medición de los ángulos.

La imposibilidad de una alineación perfecta de los tres ejes del escáner –vertical, horizontal y de colimación- también afecta a la medida.

#### Errores debidos al propio objeto de medida

La luz de los escáneres es extremadamente monocromática lo que hace que se refleje en muchas direcciones siguiendo las leyes físicas de la reflexión - apartado 4.1.4. El haz láser está afectado por la absorción de la señal que viaja a través del aire, la reflexión del material sobre el que incide, y el ángulo de incidencia entre el haz y la superficie medida. Esto implica que en



superficies muy oscuras, aquellas que absorben la mayor parte del espectro, la señal reflejada será muy débil por lo que la precisión del punto se verá afectada. Aquellas superficies que tengan una alta reflectividad proporcionarán unas medidas más fiables. Sin embargo, si este valor es demasiado alto – superficies reflectantes, metálicas, etc.- el láser será desviado reflejándose en otras superficies o incluso se propagará por el aire. A este efecto se le denomina *speckle*.

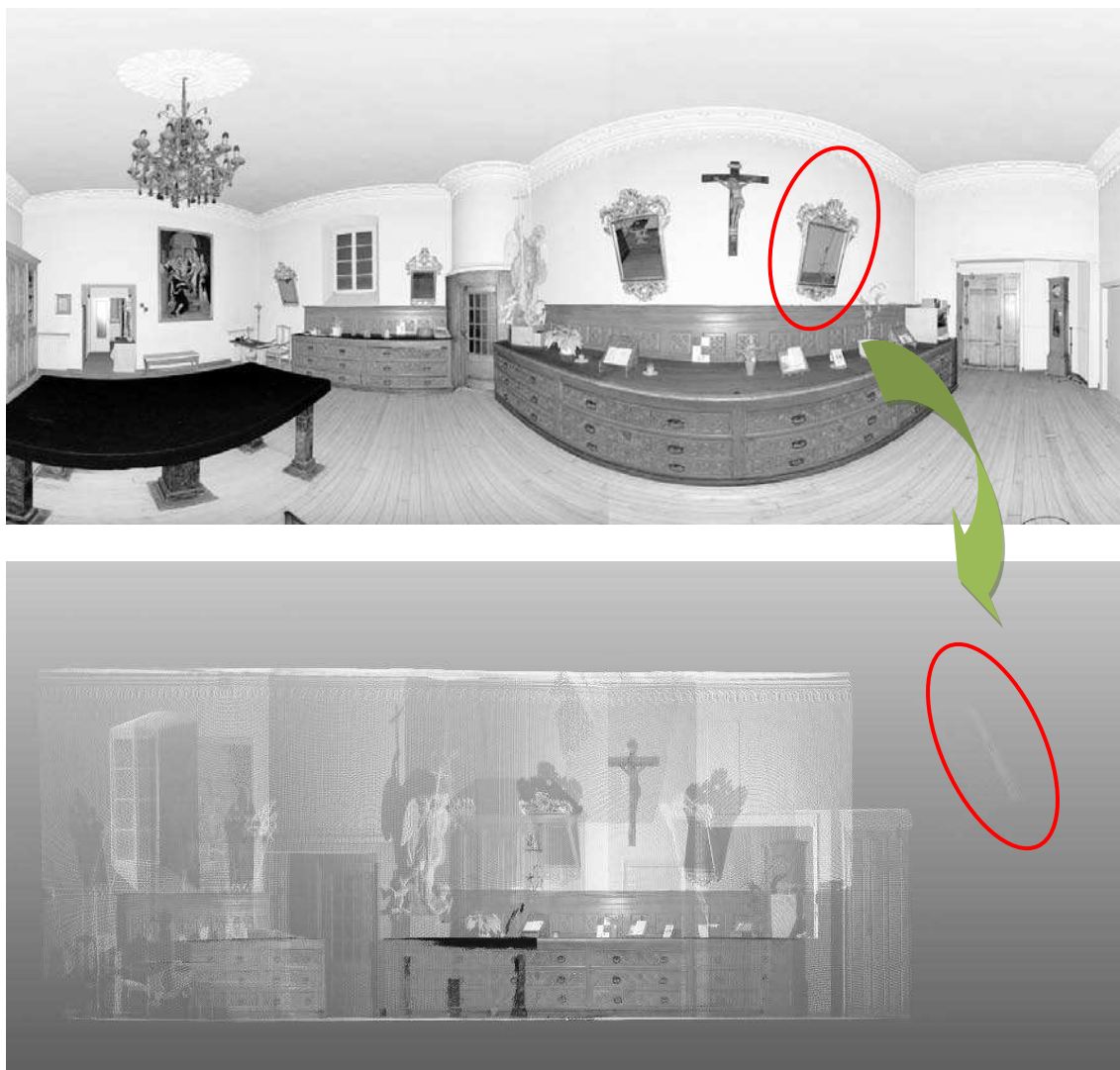


Figura 62. Vista planar (arriba) del escaneado de la sacristía de la iglesia de San Miguel (Vitoria-Gasteiz) donde se aprecia la presencia de varios espejos. En la imagen inferior se observa la vista 3D donde se puede ver el efecto del reflejo del láser sobre uno de los espejos.

Además de las propiedades reflexivas de la superficie, el color también condiciona la precisión de la medida, existiendo discrepancias significativas en la distancia, incluso produciéndose una pérdida de información por no retornar la misma señal enviada al sensor.

Existen otros materiales que están cubiertos por una capa semitransparente –por ejemplo el barniz de la madera, o el mármol- que permiten pasar el haz láser refractándose y reflejándose en el propio material. Para el cálculo óptimo de la distancia, habrá que considerar esta constante.

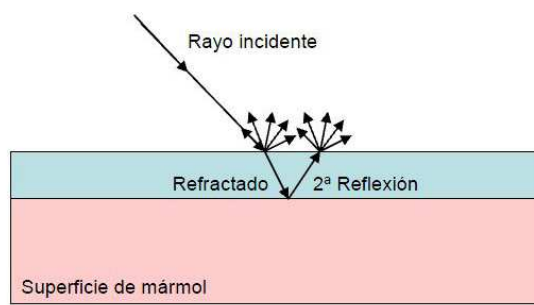


Figura 63. Efectos de la refracción en materiales semitransparentes.

En el artículo publicado por Núñez (Núñez Andrés, *et al.*), se analizan exhaustivamente estas dos últimas causas de error.

### Errores debidos a las condiciones ambientales

Las condiciones ambientales también afectan a la medida de la distancia, ya que pueden provocar variaciones en la velocidad de propagación del láser. La velocidad de propagación de las ondas depende del índice de refracción del aire, que varía con los cambios de temperatura y presión. La niebla, la calima o la lluvia debilitan la señal dispersando el haz de luz y las partículas de polvo en suspensión provocan reflexiones aisladas en el aire. Reshetyuk (Reshetyuk 2006) concluye en su tesis que los errores en condiciones atmosféricas “normales”<sup>33</sup> no son significativos y se pueden obviar en las distancias que alcanzan los escáneres medio rango (unos 100 m).

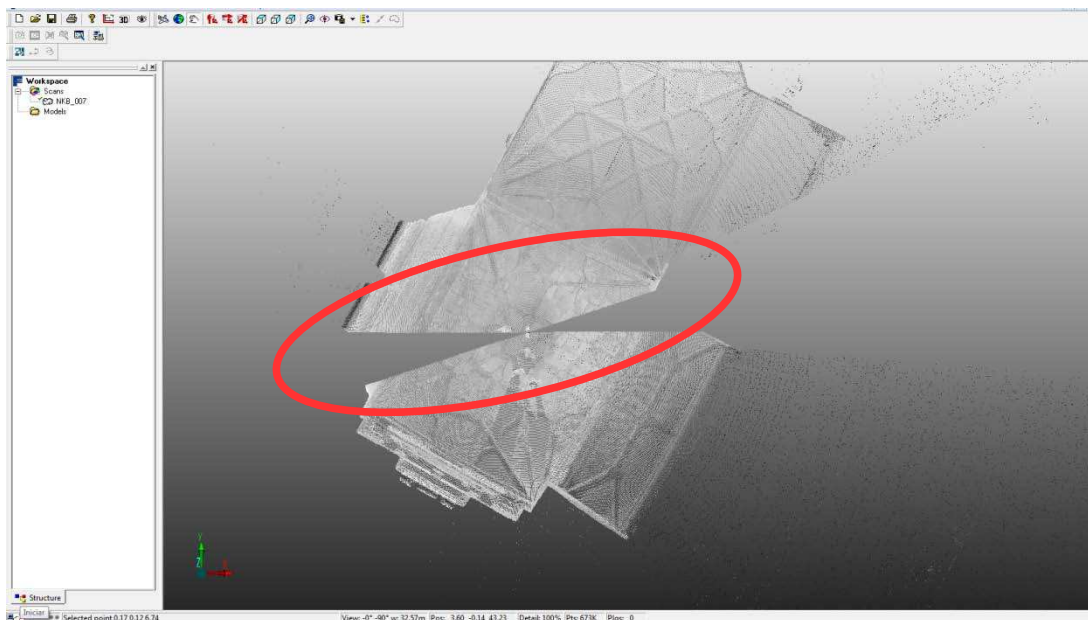


Figura 64. Ejemplo de zona sin registro de puntos debido a las bajas temperaturas en las que se realizó el proyecto.

<sup>33</sup> T=24°C, P=1013 mbar

## Errores metodológicos

A los errores hasta ahora comentados, hay que añadir aquellos propios del método de registro empleado y los debidos a la inexperiencia del usuario. Una mala elección en el instrumento de medida, o una mala configuración de los parámetros de salida del escáner, pueden arruinar o ensombrecer el resultado final obtenido en la toma de datos en campo.

### 5.3.4. Procesado de los datos

El procesamiento de las nubes de puntos implica la transformación de los datos brutos obtenidos en campo, para la obtención de un producto final, que puede ser muy variado: planos, secciones, mallados, ortofotografías, modelos texturizados, animaciones, etc.

La consecución de estos resultados requiere de un proceso de trabajo largo, en muchas ocasiones manual, y que dista mucho de ser inmediato. En la figura 66 se puede apreciar el grado de automatización de las distintas fases del trabajo con láser escáner.

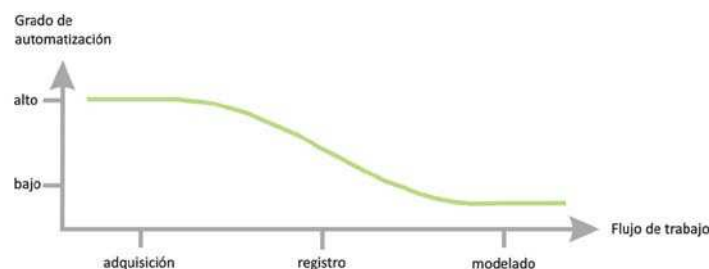


Figura 65. Automatización de las fases del procesamiento de un escaneado láser terrestre.

Los datos normalmente suelen almacenarse en ficheros ASCII cuya estructura más habitual es XYZiRGB<sup>34</sup> —siempre y cuando se hayan realizado fotografías del objeto, ya que de no haberlo hecho, el formato sería XYZi. Esta información, se podrá exportar a distintos formatos en función del software que se vaya a utilizar en la fase de procesado.

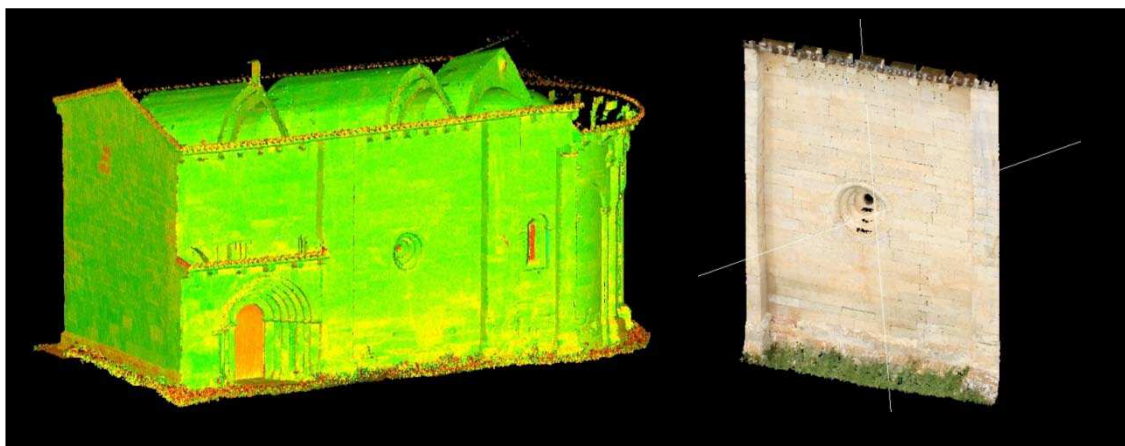
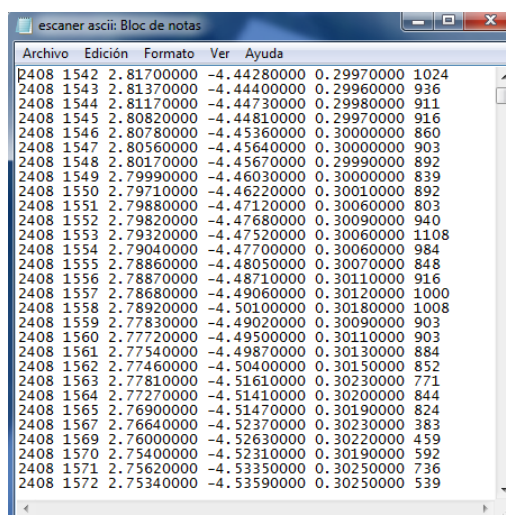


Figura 66. Modelos 3D de nubes de puntos. La imagen izquierda se corresponde con la representación de la nube de puntos según la intensidad de la señal, y la figura derecha muestra un detalle del mismo levantamiento en color verdadero.

<sup>34</sup> Coordenada X, coordenada Y, coordenada Z, valor de la intensidad, valor del color Rojo, Verde y Azul.



Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
2408	1542	2.81700000	-4.44280000	0.29970000 1024
2408	1543	2.81370000	-4.44400000	0.29960000 936
2408	1544	2.81170000	-4.44730000	0.29980000 911
2408	1545	2.80820000	-4.44810000	0.29970000 916
2408	1546	2.80780000	-4.45360000	0.30000000 860
2408	1547	2.80560000	-4.45640000	0.30000000 903
2408	1548	2.80170000	-4.45670000	0.29990000 892
2408	1549	2.79990000	-4.46030000	0.30000000 839
2408	1550	2.79710000	-4.46220000	0.30010000 892
2408	1551	2.79880000	-4.47120000	0.30060000 803
2408	1552	2.79820000	-4.47680000	0.30090000 940
2408	1553	2.79320000	-4.47520000	0.30060000 1108
2408	1554	2.79040000	-4.47700000	0.30060000 984
2408	1555	2.78860000	-4.48050000	0.30070000 848
2408	1556	2.78870000	-4.48710000	0.30110000 916
2408	1557	2.78680000	-4.49060000	0.30120000 1000
2408	1558	2.78920000	-4.50100000	0.30180000 1008
2408	1559	2.77830000	-4.49020000	0.30090000 903
2408	1560	2.77720000	-4.49500000	0.30110000 903
2408	1561	2.77540000	-4.49870000	0.30130000 884
2408	1562	2.77460000	-4.50400000	0.30150000 852
2408	1563	2.77810000	-4.51610000	0.30230000 771
2408	1564	2.77270000	-4.51410000	0.30200000 844
2408	1565	2.76900000	-4.51470000	0.30190000 824
2408	1567	2.76640000	-4.52370000	0.30230000 383
2408	1569	2.76000000	-4.52630000	0.30220000 459
2408	1570	2.75400000	-4.52310000	0.30190000 592
2408	1571	2.75620000	-4.53350000	0.30250000 736
2408	1572	2.75340000	-4.53590000	0.30250000 539

Figura 67. Fichero ASCII de una nube de puntos. Aparecen para cada punto registrado el nº de fila y columna, las coordenadas XYZ y el valor de la intensidad.

Antes de proceder al registro de las nubes, es conveniente depurarlas, es decir, eliminar todos aquellos puntos erróneos, debidos a las malas condiciones climatológicas, a fallos humanos o simplemente a obstáculos existentes durante la fase de escaneo.



Figura 68. Puntos erróneos debido a la paso de personas durante el escaneo (izquierda) y debido a las malas condiciones climatológicas.

Cuando el objeto a documentar es muy grande, son necesarios varios estacionamientos del escáner, cada uno con su propio sistema de coordenadas, debido a lo cual, con las nubes limpias, se procede al registro de los distintos escaneos. Esta unión se puede hacer de forma indirecta, empleando las señales de referencia, o con datos tomados de las propias nubes de puntos.

El *English Heritage* (English Heritage 2007) determina que el resultado del registro con blancos naturales identificados con alta precisión (bordes de ventanas, esquinas de piedras, etc.) es peor que el realizado con dianas artificiales, fundamentalmente por dos razones: (1) las entidades comunes a dos nubes de puntos diferentes no se componen de puntos idénticos, y (2) la identificación de entidades comunes es bastante subjetiva.

Cuando entre dos nubes de puntos consecutivas existe un solape de al menos 30-40% se puede utilizar la técnica *Iterative Closest Point*-ICP para alinearlas. Esta técnica consiste en identificar en ambos registros al menos 3 puntos homólogos, y el algoritmo será el que estime la transformación a aplicar. De la misma manera, se puede proceder empleando superficies en lugar de puntos.

Si el equipo que se ha utilizado lleva añadidas las funciones de estación total o lleva incorporado un GPS, no sería necesario este proceso, ya que las nubes estarían georreferenciadas de manera directa desde el mismo momento en que se registraron.

De cualquier manera, al finalizar el registro, habrá que asegurarse de que los residuos obtenidos sean iguales o menores que la precisión geométrica requerida en los resultados finales (Bryan 2006).

Según el tipo de escáner que se emplee y en lugar donde se aplique –interiores o exteriores- la nube de puntos estará afectada de más o menos ruido, es decir, puntos enturbian la imagen final. Existen algoritmos eliminan automáticamente estos puntos erróneos, fundamentándose en dos principios: (1) el hecho de que los puntos que tengan pocos o ningún punto a su alrededor son considerados ruido, y (2) la posibilidad de mover ligeramente los puntos para alcanzar una suavidad óptima de la superficie.

Al aplicar los filtros hay que prestar especial atención para no eliminar información que pudiera resultar valiosa.

El valor documental del elemento analizado obliga a garantizar que la información contenida en el modelo de la nube de puntos pueda seguir siendo accesible en un futuro, prestando atención por tanto al soporte físico donde se almacenan los datos, y a su formato. Entre los especialistas esta es una cuestión fuera de toda duda: *“Dado que el patrimonio está sujeto a continuos cambios y transformaciones, que en el peor de los casos pueden suponer su completa desaparición, toda la información referida a éste debe considerarse patrimonio en sí misma, lo que implica que debe conservarse de forma que pueda ser utilizada por futuras generaciones.”* (Rodríguez Miranda, et al. 2008).

El concepto clave en este sentido es el de la estandarización. Richard (Richards 2009) nos habla de los tres tipos de estándares tecnológicos: los técnicos -que tienen que ver con el hardware y el software-, los de contenido -que comprenden los sistemas de captura- y los de metadatos. En España de momento no existen leyes, normas ni recomendaciones al respecto (con la salvedad de unas primeras experiencias recogidas en (Lopetegi Galarraga, et al. 2006), de modo que la normativa desarrollada por el *English Heritage* (Bryan 2006) se antoja como el mejor modelo a seguir.

Según esta institución, los metadatos de deberían subdividir en metadatos del escaneado, del proyecto, del registro y la información de apoyo. Dentro de cada grupo se incluiría la siguiente información:

- ✓ Metadatos del escaneado: nombre del fichero y datos crudos, fecha de la toma, sistema de escáner utilizado, nº de serie del fabricante, compañía, nombre del



monumento, número de levantamiento, número total de puntos, densidad de puntos en el objeto con la distancia de referencia.

- ✓ Metadatos del proyecto: Nombre del fichero con los datos crudos utilizados, fecha de la toma, sistema de escáner utilizado, nº de serie del fabricante, compañía, nombre del monumento, número de levantamiento, número de escaneos individuales, número total de escaneos, número total de puntos, nombre del fichero con los datos del apoyo, descripción del método de registro, un plano con los estacionamientos realizados numerados, condiciones climatológicas durante el levantamiento, cualquier otra información específica.
- ✓ Información del registro para cada estacionamiento del escáner: traslaciones en los ejes XYZ, rotaciones en torno a los 3 ejes XYZ.
- ✓ Información de apoyo

Toda esta documentación asociada a las nubes de puntos se deberá entregar en formato digital y en papel.

#### 5.3.4.1. Software

Como se ha visto en el anterior epígrafe, una fase muy importante del trabajo con nubes de puntos reside en el procesado de los datos, para lo cual es imprescindible el empleo de diversos programas.

Cada escáner suele trabajar con el software propio de la casa comercial, fundamentalmente para realizar las tareas de escaneo en campo, limpieza y unión de las nubes de puntos y visualización de los datos, tareas básicas del procesado. Es partir de aquí cuando se está en disposición de realizar los distintos productos que se necesitan según los objetivos establecidos al comienzo del proyecto. Podríamos agrupar estos programas en dos grandes grupos: (1) aquellos que sirven para importar las nubes de puntos a programas de diseño asistido por ordenador, de tal forma que sea posible la delineación de planos, contornos, etc.; y (2) programas mucho más sofisticados diseñados para la elaboración de productos más complejos, como pueden ser mallados, ortofotografías, modelos virtuales, etc.

En la tabla que aparece a continuación se muestran algunos de los software comerciales para el tratamiento de las nubes de puntos.

SOFTWARE	CASA COMERCIAL	APLICACIONES	WEB
POINTTOOLS Suite	POINTTOOLS	Versión completa	<a href="http://www.pointtools.com/">http://www.pointtools.com/</a>
POINTTOOLS Edit	POINTTOOLS	Limpieza y procesado de nubes	<a href="http://www.pointtools.com/">http://www.pointtools.com/</a>
POINTTOOLS View Pro	POINTTOOLS	Visualizador	<a href="http://www.pointtools.com/">http://www.pointtools.com/</a>
POINTTOOLS Rhino	POINTTOOLS	Para Rhinoceros	<a href="http://www.pointtools.com/">http://www.pointtools.com/</a>
POINTTOOLS Model	POINTTOOLS	Plugin para trabajar en AutoCad	<a href="http://www.pointtools.com/">http://www.pointtools.com/</a>
POINTTOOLS Sketchup	POINTTOOLS	Plugin Sketchup	<a href="http://www.pointtools.com/">http://www.pointtools.com/</a>
Cyclone REGISTER	LEICA	Limpieza y procesado de nubes	<a href="http://www.leica-geosystems.es/es/Leica-">http://www.leica-geosystems.es/es/Leica-</a>

			<a href="http://www.leica-geosystems.es/es/Leica-Cyclone_6515.htm">Cyclone_6515.htm</a>
<b>Cyclone MODEL</b>	LEICA	Obtención de distintos productos: mallas, ortos, modelos 3D	<a href="http://www.leica-geosystems.es/es/Leica-Cyclone_6515.htm">http://www.leica-geosystems.es/es/Leica-Cyclone_6515.htm</a>
<b>Cyclone VIEWER</b>	LEICA	Visualizador	<a href="http://www.leica-geosystems.es/es/Leica-Cyclone_6515.htm">http://www.leica-geosystems.es/es/Leica-Cyclone_6515.htm</a>
<b>Cyclone PUBLISHER</b>	LEICA	Publicación en internet	<a href="http://www.leica-geosystems.es/es/Leica-Cyclone_6515.htm">http://www.leica-geosystems.es/es/Leica-Cyclone_6515.htm</a>
<b>CLOUDWORX</b>	LEICA	Plugin para trabajar en AutoCad	<a href="http://www.leica-geosystems.es/es/Leica-CloudWorx_60696.htm">http://www.leica-geosystems.es/es/Leica-CloudWorx_60696.htm</a>
<b>JRC 3D RECONSTRUCTOR full</b>	GEXCEL	Versión completa	<a href="http://www.gexcel.it/en/prodotti/jrc-3d-reconstructor">http://www.gexcel.it/en/prodotti/jrc-3d-reconstructor</a>
<b>JRC 3D RECONSTRUCTOR PHOTO</b>	GEXCEL	Obtención de distintos productos: mallas, ortos, modelos 3D	<a href="http://www.gexcel.it/en/prodotti/jrc-3d-reconstructor">http://www.gexcel.it/en/prodotti/jrc-3d-reconstructor</a>
<b>JRC 3D RECONSTRUCTOR (Faro)</b>	GEXCEL	Especialmente pensado para trabajar con datos de ese escáner. Módulos de construcción y patrimonio	<a href="http://www.gexcel.it/en/prodotti/jrc-3d-reconstructor">http://www.gexcel.it/en/prodotti/jrc-3d-reconstructor</a>
<b>JRC 3D RECONSTRUCTOR (ILRIS)</b>	GEXCEL	Especialmente pensado para trabajar con datos de ese escáner. Módulos de túneles, minas, etc.	<a href="http://www.gexcel.it/en/prodotti/jrc-3d-reconstructor">http://www.gexcel.it/en/prodotti/jrc-3d-reconstructor</a>
<b>POINTCLOUD</b>	KUBIT	Plugin para trabajar en AutoCad	
<b>FARO SCENE</b>	FARO	Visor	<a href="http://www.faro.com/focus/es/software">http://www.faro.com/focus/es/software</a>
<b>FARO CLOUD</b>	FARO	Limpieza y procesado de nubes	<a href="http://www.faro.com/focus/es/software">http://www.faro.com/focus/es/software</a>
<b>IMAGEMASTER PRO</b>	TERRADAT	Limpieza y procesado de nubes y fotogrametría	<a href="http://www.getláscanning.com/products/imagemaster-pro-software">http://www.getláscanning.com/products/imagemaster-pro-software</a>
<b>EDGEWISE3D</b>	TERRADAT	Extracción de líneas	<a href="http://www.getláscanning.com/products/edgewise3d">http://www.getláscanning.com/products/edgewise3d</a>
<b>POINTTOOLS VIEW</b>	TERRADAT	Visor	<a href="http://www.getláscanning.com/products/pointtools-view-pro">http://www.getláscanning.com/products/pointtools-view-pro</a>
<b>POLYWORKS</b>	INNOVMETRIC	Modelos poligonales y superficies, mallados	<a href="http://www.innovmetric.com/polyworks/3D-scanners/home.aspx?lang=en">http://www.innovmetric.com/polyworks/3D-scanners/home.aspx?lang=en</a>
<b>POLYWORKS INVIEW</b>	INNOVMETRIC	Visor	<a href="http://www.innovmetric.com/polyworks/3D-scanners/viewer.aspx?lang=en">http://www.innovmetric.com/polyworks/3D-scanners/viewer.aspx?lang=en</a>
<b>RAPIDFORM XOS</b>	RAPIDFORM	Modelos poligonales y superficies, mallados	<a href="http://www.rapidform.com/">http://www.rapidform.com/</a>

Tabla 14. Algunos de los software comerciales diseñados para trabajar con nubes de puntos.

## 5.4. Metodologías acústicas

Los sistemas acústicos se basan en la generación de pulsos acústicos en un punto de una estructura, bien mediante percusión o a través de un dispositivo transmisor-receptor.

En los sistemas acústicos, la resolución, es decir el tamaño del objeto más pequeño detectable, está relacionada con la longitud de onda incidente y con el tamaño del blanco. Dicha longitud de onda es directamente proporcional a la velocidad de propagación e inversamente proporcional a la frecuencia del pulso. Es beneficioso emplear una alta frecuencia para



proporcionar la mayor resolución posible, pero teniendo en cuenta siempre la atenuación de la energía de la onda.

En cualquier caso, la frecuencia óptima se elegirá considerando los requerimientos de atenuación y de resolución así como el material que se pretende estudiar; por ejemplo, en el caso de los metales la frecuencia ideal será de 15 MHz mientras que en hormigones y madera será de 45-54 KHz.

#### 5.4.1. Sistemas acústicos

Los sistemas acústicos más empleados en las estructuras de fábricas son los métodos ultrasónicos, los sónicos, el impacto eco y finalmente la tomografía ultrasónica, sónica o de radar. En las siguientes líneas describiremos únicamente el funcionamiento de los dos primeros.

Cuando se trabaja con estas técnicas se pueden emplear tres tipos de ensayos:

- Ensayo directo o través del muro, en el cual el martillo y los acelerómetros están situados en líneas sobre caras opuestas del elemento de fábrica.
- Ensayo semidirecto, en el cual el martillo y los acelerómetros se emplazan formando un cierto ángulo entre uno y otro.
- Ensayo indirecto, en el que tanto el martillo como los acelerómetros se localizan en la misma cara de la pared, en una vertical u horizontal.

##### 5.4.1.1. Métodos ultrasónicos

Las primeras aplicaciones de los ensayos ultrasónicos, para la evaluación de los materiales que conforman las fábricas, fueron llevadas a cabo en los años sesenta. Este tipo de prueba está muy limitada para la evaluación de material muy heterogéneo, pero en el caso de querer evaluar elementos de baja porosidad, o elementos pétreos aislados (sillares o mampuestos de compacidad adecuada) el resultado es muy satisfactorio.

Debido a su corta longitud de onda, los pulsos ultrasónicos se propagan en línea recta, por lo que son muy direccionables. Cuanto mayor sea la longitud de onda, mayor será la dispersión angular que se produce.

La generación de ondas ultrasónicas se basa en la emisión de una señal por parte de la unidad de pulso al transductor, el cual genera una onda de tensión de baja energía y alta frecuencia. Los transductores o palpadores han de estar acoplados a la superficie para transmitir el máximo de energía posible. La onda viaja entonces a través de la sección, siendo captada por el receptor, que podrá estar en distintas posiciones según el método que se emplee, tal y como hemos comentado anteriormente.

Para materiales rocosos la frecuencia más adecuada está en torno a los 50 KHz. En la siguiente tabla se pueden apreciar la velocidad de propagación de los ultrasonidos para distintos tipos de rocas.

TIPO DE ROCA	VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN (m/s)
Granito	3000-5000
Basalto	4500-6500
Gabro	4500-6500
Arenisca	1400-4000
Caliza	2500-6000
Marmol	3500-6000
Cuarcita	5000-6500
Pizarra	3500-5500

Tabla 15. Velocidad de propagación de los ultrasonidos en distintos tipos de rocas.

En estructuras de madera y hormigón también se emplean estos métodos, existiendo correlaciones entre la velocidad ultrasónica y diferentes propiedades de los materiales.

#### 5.4.1.2. Métodos sínicos

Los métodos sínicos se basan en la generación de ondas mecánicas de baja frecuencia mediante un martillo instrumentado. Estos martillos suministran una masa cayendo a una determinada distancia, por lo la masa y la dureza de la cabeza del mismo definen la energía u la frecuencia de la onda inicial. La onda mecánica es recogida por un receptor, normalmente un acelerómetro que puede colocarse en varias posiciones, el cual motiva a un registrador digital que comienza a registrar datos a medida que son percibidos por el receptor.

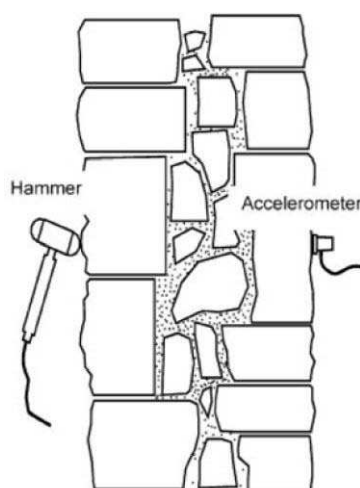


Figura 69. Sistema sónico aplicado a una pared.

La elaboración de los datos consiste en medir el tiempo que tarde el impulso en recorrer la distancia entre el transmisor y el receptor, y con este valor se determina la velocidad de propagación de la onda en el medio.

Cuando se emplean los ensayos sínicos para la evaluación de obras de fábrica se suele hacer con los siguientes objetivos:

- Calificar la fábrica a través de la morfología de la sección de la pared.
- Detectar la presencia de vacíos y defectos.
- Encontrar patrones de agrietamiento
- Controlar la eficacia de la reparación por técnicas de inyección.
- Detectar cuando han cambiado las características físicas de los materiales.

Este tipo de ensayo es muy útil en el caso de análisis de materiales muy heterogéneos, pero sin embargo tienen también una serie de limitaciones como son:

- Cada vez que se trabaja con ellos, hay que realizar un gran número de mediciones con el coste que ello supone.
- La elaboración de los resultados es dificultosa debido a la heterogeneidad de los materiales.
- La velocidad del pulso sónico es característica de cada tipología de fábrica, siendo imposible generalizar los valores. Los ensayos han de ser calibrados para los diferentes tipos de fábrica directamente *in situ*.
- Es muy compleja la relación entre los parámetros sónicos y las características mecánicas de los materiales.

## 3ª PARTE

---

### 6. APLICACIONES DE LAS TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS AL PATRIMONIO CONSTRUIDO

Tras haber analizado en los capítulos anteriores los fundamentos y principios de algunas de las técnicas no destructivas más representativas, ahora es el momento de analizar la aportación de dichos ensayos al estudio de los edificios históricos. Antes de mostrar dichas contribuciones, explicaremos brevemente qué es la Arqueología de la Arquitectura y sus requerimientos, a fin de poder evaluar la conveniencia o no de la aplicación de las TND a la misma. Asimismo, el conocimiento en la medida que sea posible, de los rasgos generales que definen la mayor parte de los edificios, contribuirá a un mejor diseño de la estrategia de estudio.

#### 6.1. Requerimientos de la Arqueología de la Arquitectura

A finales de los años 70, surge en Italia una nueva forma conceptual de abordar el estudio del paso del tiempo en los edificios históricos y que supuso un importante avance en el conocimiento de las técnicas constructivas de la antigüedad. Esta nueva metodología originalmente se denominaría lectura de alzados o de lo conservado y es en 1990 cuando el arqueólogo italiano Tiziano Manoni acuña el nombre de Arqueología de la Arquitectura. Sin embargo, no es hasta la incorporación al estudio de la estratigrafía cuando se inició lo que actualmente se conoce con dicho nombre (Azkarate Garai-Olaun, *et al.* 2002).

Los primeros trabajos llevados a cabo con esta técnica se desarrollaron en asentamientos y complejos arquitectónicos en ruina o abandonados, donde lo que se pretendía era recoger información sobre todo tipo de fuente material y a todas las escalas ya que no existía otro tipo de documento. Se trataba de primar por encima de todo, la lectura de la información contenida en los propios muros y para ello se hizo uso de la estratigrafía, el estudio de las técnicas de construcción, los análisis arqueométricos y el análisis de las distintas tipologías de materiales. Es decir, mediante la aplicación de instrumentos o herramientas propias de una excavación arqueológica (Francovich and Manacorda 2001).

Inicialmente, esta forma de abordar el análisis de los edificios se consideró como una parte más del estudio del yacimiento, adoptando los criterios de registro propios de la excavación arqueológica: dibujo detallado y anotación de observaciones en fichas. Sería en una fase más avanzada, cuando se empezaría a experimentar y verificar las posibilidades que ofrecía el análisis estratigráfico fuera de la excavación.

#### La lectura estratigráfica de alzados

Cuando se acomete la tarea de excavar un yacimiento, lo que en realidad se está haciendo es analizar la secuencia estratigráfica aparecida, es decir, determinar el orden cronológico relativo en el que fue creada dicha estratificación. Para llevar a cabo esta actividad, el

arqueólogo trata de identificar unidades homogéneas, individualizándolas y tratando de encontrar las relaciones<sup>35</sup> existentes entre todas ellas. Estas relaciones quedarán reflejadas en un croquis, denominado *Matrix Harris*, en el cual los elementos más antiguos aparecerán en la zona baja, mientras que los más modernos aparecerán en las primeras líneas (Harris 1989).

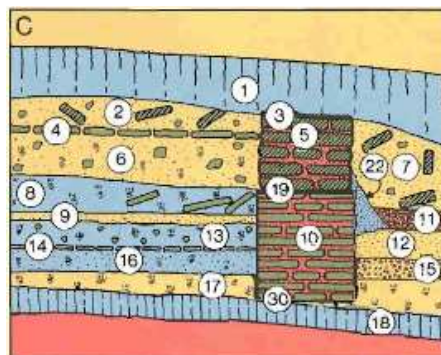


Figura 70. Sección vertical de un yacimiento arqueológico. Los números representan las distintas unidades estratigráficas que han aparecido.

De manera similar al modo de proceder en un yacimiento arqueológico es como se ha de acometer la lectura de alzados; mediante la identificación de la secuencia estratigráfica impresa en los paramentos de los edificios. Es necesario individualizar y marcar las partes homogéneas del alzado (en este caso en función del material, la técnica constructiva empleada, las dimensiones de las piezas, los acontecimientos, etc.) siendo indispensable determinar la cronología relativa entre las distintas partes identificadas. Posteriormente se plasmarán todas estas relaciones en una matrix y será después al comparar las relaciones del diagrama con otro tipo de fuentes cuando se llegue a determinar la historia constructiva del tejido edificado de manera detallada, obteniendo información acerca de las técnicas constructivas que se emplearon, de la cronotipología absoluta y relativa, los materiales de construcción (mensiocronología), etc.

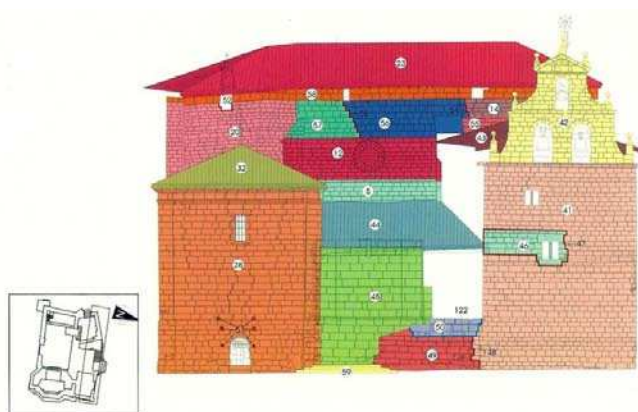
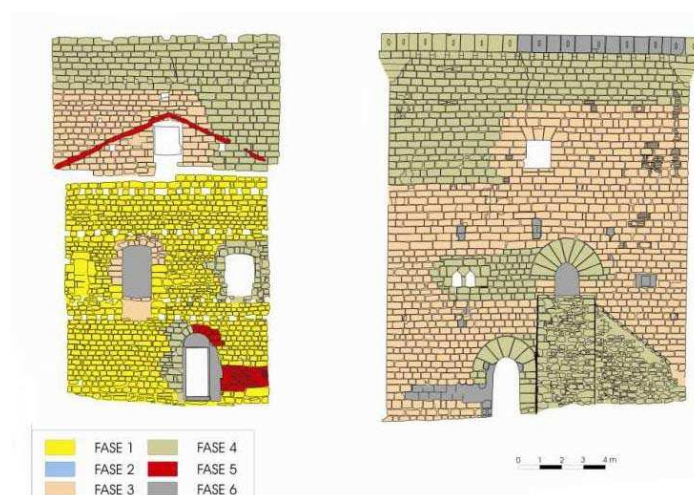


Figura 71. Lectura de alzados en la que cada color representa una unidad estratigráfica identificada.

<sup>35</sup> En una excavación arqueológica la relación entre las distintas unidades solo puede ser de tres tipos: (1) las unidades no tienen conexión estratigráfica directa, (2) las unidades se superponen y (3) las unidades se interrelacionan como partes separadas de un todo. (Harris 1989).

### El edificio “tipo” a estudiar

La Arqueología de la Arquitectura se ocupa fundamentalmente del estudio de aquellos edificios en los que se puede percibir la fábrica con la que fueron levantados, así como las distintas intervenciones que se han llevado a cabo en los mismos hasta la actualidad. La existencia de varias obras diferentes en un mismo inmueble radica en la lógica de la reparación y el reaprovechamiento histórico de los elementos constructivos (Tabales Rodríguez 1997). No hay que olvidar que en época preindustrial, los plazos de construcción se dilataban mucho en el tiempo, llegando en casos extremos a implicar a varias generaciones, lo cual hacía que el proyecto arquitectónico variase en muchas ocasiones mientras duraba el proceso de construcción. Los edificios históricos son un complejo sistema de obras que se superponen unas a otras constantemente. Estas intervenciones no se encuentran aisladas, sino que tienen contacto directo con el resto y esa relación física será la que indique la cronología en la que se fueron formando (García Gómez 2005).



*Figura 72. Alzado sur (interior y exterior) de la torre de Martiartu (Bizkaia) donde se pueden apreciar las distintas intervenciones llevadas a cabo en la misma.*

En algunas ocasiones, estos edificios están enlucidos bien mediante lechadas de cal, enlucidos de cemento o mediante la colocación de un forro de sillería que oculta la obra original. Muchas veces el paso del tiempo ha hecho que estos revestimientos se destruyan y dejen a la vista la totalidad o parte de la obra.



*Figura 73. Forro de sillería cubriendo la obra original (izquierda) y revoco de cal (derecha).*



Otra característica propia de los edificios históricos es la estructura de madera que sustenta la cubierta, y en ocasiones muy dañada debido al paso de tiempo y a las distintas intervenciones llevadas a cabo en el inmueble. Su mal estado provoca problemas de humedad y estructurales que pueden acabar afectando a otras partes de la construcción.



*Figura 74. Estructura de madera de la bajo cubierta de una iglesia.*

En lugares de interés histórico, y donde no se haya llevado a cabo ningún tipo de intervención reciente, el subsuelo normalmente albergará restos de estructuras anteriores, así como enterramientos. El trabajo bajo cota cero complementará el realizado en los alzados y viceversa.

## **6.2. Contribución de las TND al estudio del Patrimonio Construido**

En la rehabilitación de un edificio histórico, el análisis arqueológico de sus paramentos se configura como una de las herramientas principales, suponiendo el aporte más consistente en cuanto a información estratigráfica y estructural (Tabales Rodríguez 1997). El objetivo de estas lecturas de alzados no se queda únicamente en el conocimiento de la evolución histórica del edificio, sino que va más allá. Mediante el análisis de las distintas fases constructivas se puede llegar en muchas ocasiones a conocer el por qué de muchos problemas estructurales más complejos.

La fragilidad de muchos edificios históricos y la existencia de elementos arquitectónicos irremplazables, implica muchas veces la puesta en marcha de procesos de restauración y/o conservación en los que la intervención a realizar sobre el inmueble sea mínima. Para acometer estas acciones es necesario disponer de una documentación actualizada y precisa de los mismos. Es importante conocer, en la medida en que esto sea posible, datos sobre la fundación del edificio, obras que se han ido acometiendo con el paso del tiempo, posibles existencias anteriores, características estructurales, zonas que potencialmente pueden sufrir mayores daños, etc. (Pérez-Gracia, *et al.* 2009).



### 6.2.1. La documentación geométrica del edificio

A la hora de afrontar cualquier proyecto de rehabilitación es importante disponer desde el inicio de una documentación geométrica del edificio, que sea exhaustiva, de precisión y lo más actualizada posible (Bosiljkov, *et al.* 2010). Este registro constituye en sí mismo un documento que refleja el estado del inmueble en un determinado momento de su historia. Pero además, es interesante que sirva como base a futuros proyectos histórico-arqueológicos, arquitectónicos o de restauración que se vayan a acometer en el mismo.

Tal y como exponíamos en los objetivos del trabajo, el registro geométrico además de cumplir con estos requisitos previos, debe tender a ser la plataforma única sobre la que se plasmen los resultados de las diferentes acciones que se lleven a cabo durante el proceso de estudio, análisis o recuperación del edificio, fomentando una interdisciplinariedad entre los distintos profesionales o investigadores afectados. El edificio ha de ser entendido como un sistema único, pero no por ello homogéneo (Azkarate, *et al.* 2001).

Un ejemplo cercano de esto que pretendemos, lo encontramos en la redacción del Plan Director de restauración de la Catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz (Azkarate, *et al.* 2001), donde a partir de una base geométrica obtenida por fotogrametría, se ha dado lugar al SIM (Sistema de Información Monumental) que aloja información de muy diversas tipologías. Así encontramos plasmados sobre esta base gráfica los resultados del estudio histórico, de humedades, de patologías, de elementos constructivos, litologías, policromías, etc.



Figura 75. Representación sobre la base fotogramétrica de distintas cartografías temáticas: fases constructivas, litologías y patologías. Alzado su de la torre de la Catedral de Santa María, Vitoria-Gasteiz.

En el momento en que se comenzaron los trabajos de restauración de este templo (1995-1996) la fotogrametría se presentaba como la técnica que mejor reflejaba las necesidades del momento. Además de cumplir con las exigencias métricas necesarias, proporcionaba la base perfecta para la plasmación de los distintos estudios, ya que era necesario descomponer el edificio en partes elementales, tanto para la realización de análisis pormenorizados como para enlazar la base gráfica con la información alfanumérica generada.

En este momento, de entre todas las posibles técnicas de documentación, nos hemos decantado por el escáner terrestre, fundamentalmente por su potencialidad dentro del campo patrimonial. La toma indiscriminada de datos que realiza, supone la obtención de una réplica prácticamente exacta del edificio, objetiva, ya que no requiere ninguna interpretación por parte del operador, fiel a la realidad existente y extremadamente rápida; desafíos importantes a conseguir en edificios en mal estado de conservación como suele ser el caso. La presencia de escáneres de distintos rangos de precisión y alcances facilita en gran medida la toma de datos “a la carta” en función del elemento a documentar.

Tal y como se ha comentado en el proyecto de la Catedral Santa María, de cara a plasmar en esta base gráfica distintos estudios que se realicen, es necesario identificar unidades mínimas en las que descomponer el edificio. En este caso, serán cada uno de los millones de puntos que componen el modelo, los que constituyan ese elemento mínimo.

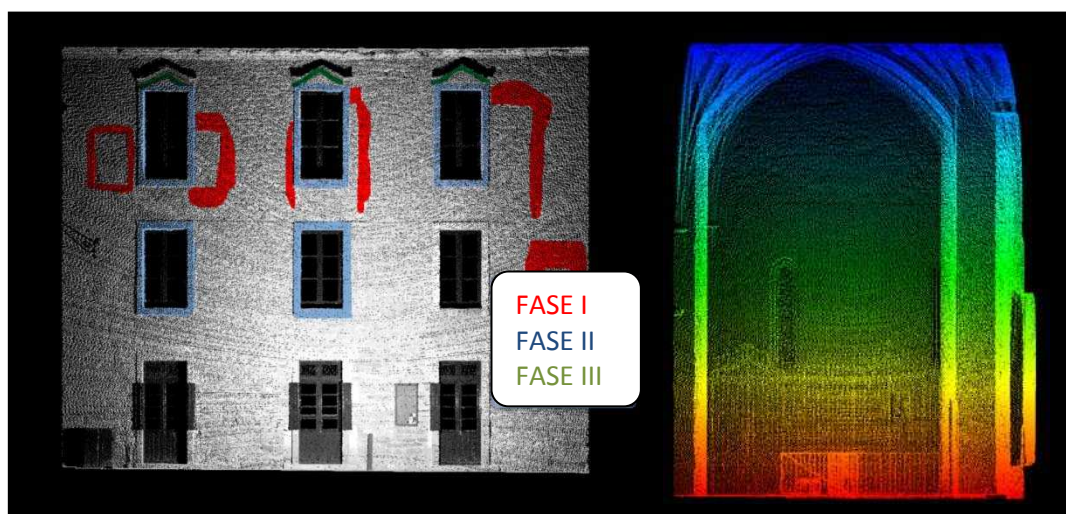


Figura 76. Lectura estratigráfica de alzados y mapa de inclinación realizados sobre la nube de puntos obtenida con el escáner terrestre.

Las características de estas nubes de puntos tridimensionales permitirán además no solo la incorporación de diversos estudios, sino que podrán acoger datos procedentes de distintos sensores; se trata de proyectar todo tipo de imágenes (termografías, radargrafías, etc.) sobre una misma base geométrica, empleando los mismos principios con los que se proyectan imágenes visibles. Será necesario por tanto aplicar todos los procedimientos que se requieran, la calibración de los sensores, la medida de puntos de control, los ajustes radiométricos, etc. tal y como se ha ido recogiendo a lo largo del texto.

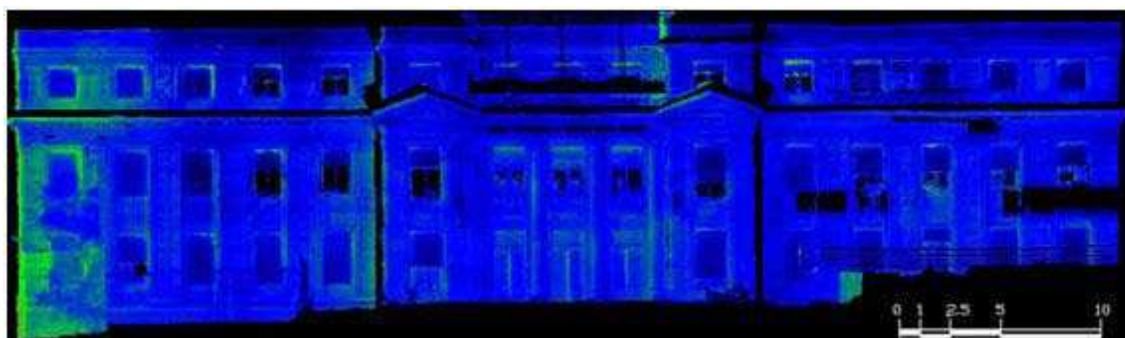


Figura 77. Ortotermodrma obtenido de la nube de puntos. Fuente: (Lagüela, et al. 2011b)

## 6.2.2. Contribución de las termografías

### Estructuras

La cámara termográfica constituye un instrumento imprescindible para el conocimiento sistemático del armazón de un edificio; son muy pocas las oportunidades que tenemos de observarlo, pues pocos son los inmuebles que prescinden de los enfoscados. Visualizar la estructura de madera de un edificio puede servirnos para descubrir una cronotipología de los modos de estructurar.



Figura 78. Imagen visible y térmica de un alzado enfoscado. Se aprecia que los colores de los entramados, es decir, el de la madera, se corresponde con los valores más altos de temperaturas. A la derecha interior del inmueble donde se comprueba lo observado desde el exterior.



En la siguiente imagen, figura 79, también se aprecia bien el entramado, pero en este caso no se trata de madera, sino posiblemente de hormigón o acero. Se puede comprobar la perpendicularidad de las vigas además del bajo calor que desprenden. En el caso que hemos explicado anteriormente se veía como al tratarse de un entramado de madera, éste ofrecía los valores de temperatura más altos, al contrario de lo que ocurre en estos dos casos, donde los valores más bajos se corresponden al entramado.

Tal y como aparece en la tabla 7 se puede ver que el calor específico de la madera es de los más altos -2386 J/kg\*k para la madera de roble-, mientras que el del hormigón es de apenas 837 J/kg\*k y el del acero de 460 J/kg\*k.



Figura 79. Imágenes visibles y térmicas de edificios con estructura de hormigón.

## Materiales

Otra utilidad de la termografía en edificios es a la hora de determinar los distintos materiales que los forman. En apartados anteriores se ha visto como determinados materiales tenían un coeficiente de emisividad muy bajo, ya que normalmente eran superficies muy pulidas, con mucho brillo, etc. En la siguiente figura se observa como las piedras mejor talladas, aquellas más pulidas y con menor rugosidad – las que se encuentran en la puerta de entrada- muestran temperaturas más bajas.

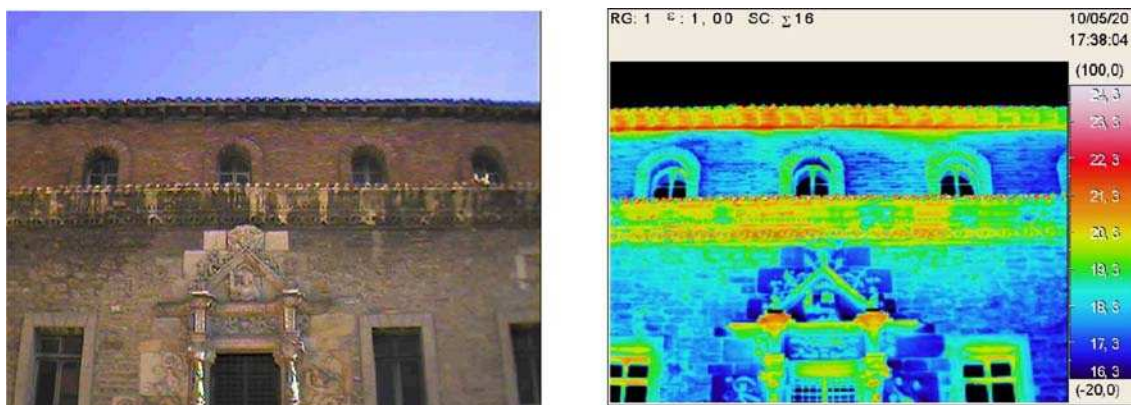


Figura 80. Identificación de litologías en la imagen infrarroja .Fachada norte del Palacio Escoriaza-Esquibel (Vitoria-Gasteiz). Se aprecian en distintos colores varias litologías como son la arenisca de Elguea, la calcarenita de Olárizu y la lumaquela de Ajarte, además de ladrillos y elementos de madera.

La confección sistemática de tablas donde se reflejen los rangos térmicos en los que se mueven los distintos materiales, podría permitirnos distinguir los distintos tipos de material empleado detrás de las diversas capas de enfoscado.

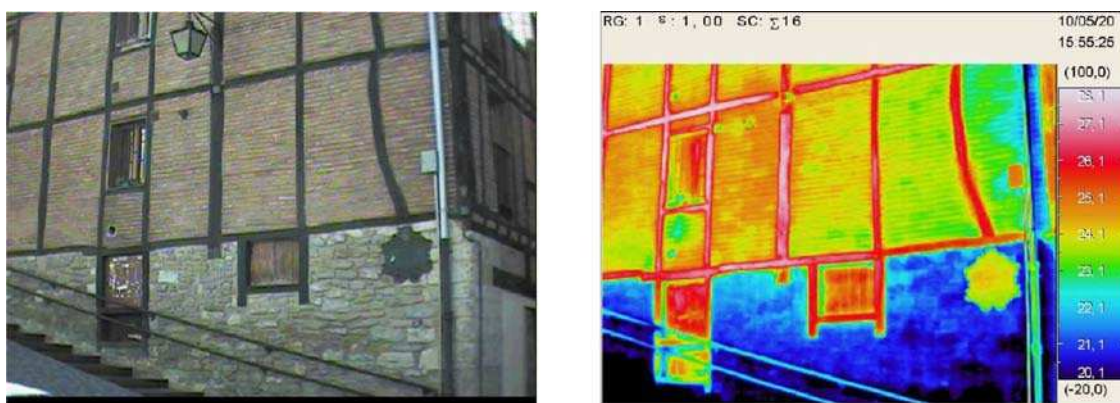


Figura 81. Comportamiento térmico desigual de los distintos materiales.

Otra posible línea de investigación es la aplicación de las imágenes termográficas a la mensiocronología, en concreto a la mensiocronología latericia. En algunas imágenes, figura 82, se aprecia claramente en un paramento tanto el aparejo como el número de hiladas y el número de ladrillos por hilada. Es decir, se puede saber el número total de piezas aunque no las dimensiones exactas de cada una, ya que por lo general se distingue claramente el ladrillo del mortero o la argamasa pero sus límites se presentan lo suficientemente difusos como para impedir mediciones precisas.

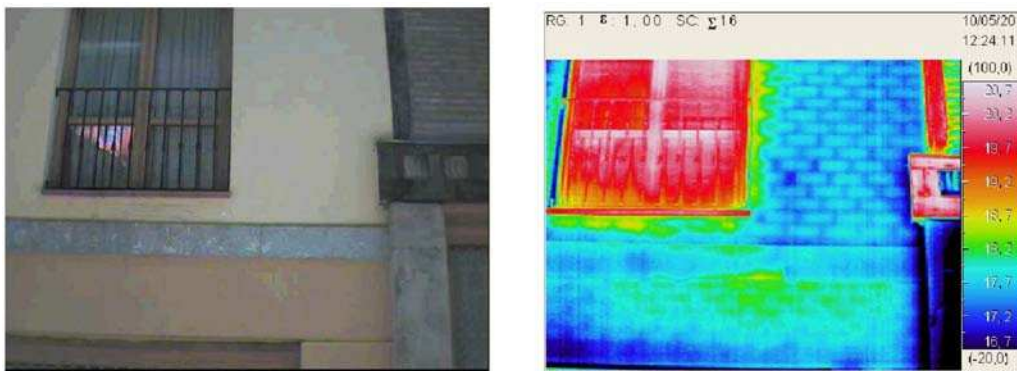


Figura 82. Fachadas enlucidas donde se aprecia el ladrillo

### Técnicas constructivas

Hasta aquí hemos hablado de las puertas que se nos abren para el conocimiento de la estructura interna de los edificios, también para el conocimiento de los materiales, pero aun se puede añadir algo más. Podemos rastrear la presencia de algunas remodelaciones, como el cegado de vanos, pero sobre todo podemos visualizar -bien es verdad que no siempre- el tipo de aparejo que se oculta bajo los enfoscados. La resolución o nitidez de la captura termográfica puede ser un obstáculo, pero -independientemente de que en un futuro las cámaras mejoren técnicamente- tendremos los indicios suficientes como para distinguir una mampostería de una sillería o un sillarejo, discernir incluso la altura de hiladas regulares o calcular módulos.

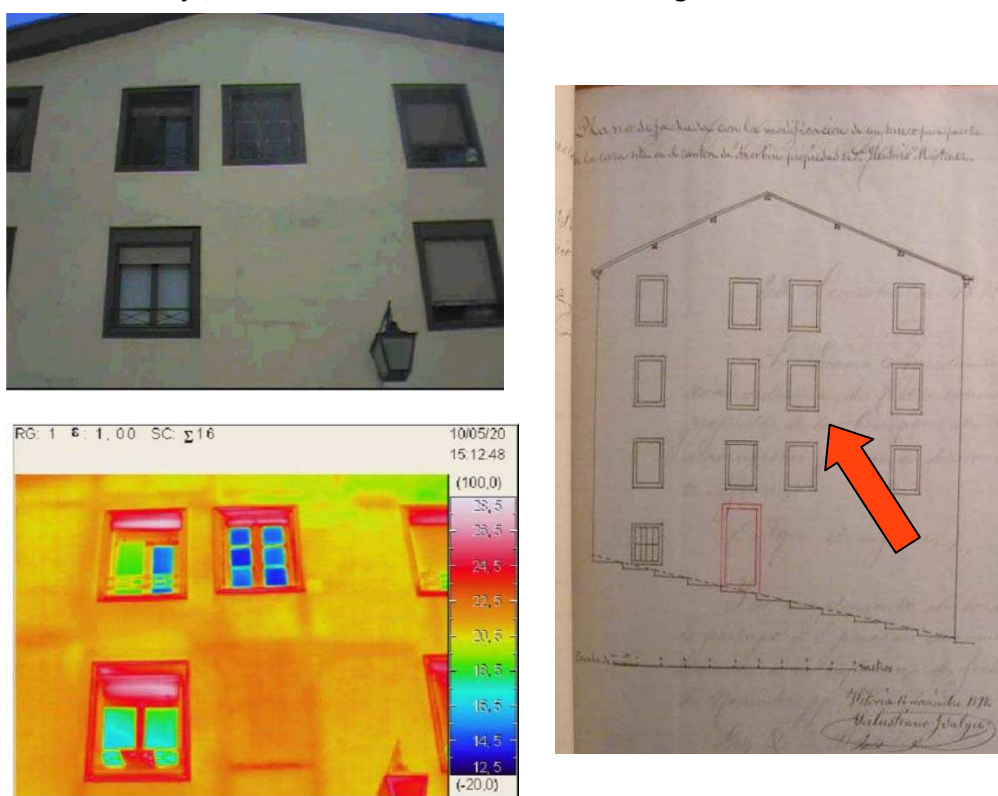


Figura 83. Vano cegado en un inmueble enlucido y comprobación de su anterior existencia en un plano antiguo.

Como decíamos, una de las aplicaciones de las termografías a la edificación y más en concreto al estudio de edificios históricos puede ser precisamente la detección de vanos cegados o



elementos que permanecen ocultos tras una capa de enlucido (Imposta, 2010). En este ejemplo podemos ver como en la parte central y tras un enfoscado de cal se ve una posible ventana cegada, cuyo marco de madera de distingue aun mejor debido al calor específico del material. Además observando el resto del edificio parece lógico pensar que para mantener la simetría del alzado en ese cegado antes había una ventana. La fotografía colocada más a la derecha del grupo (AMV) es un plano realizado en 1898 para la apertura de una puerta precisamente en el inmueble sobre el que estamos hablando y que muestra como efectivamente donde ahora vemos el cegado antes hubo una ventana.

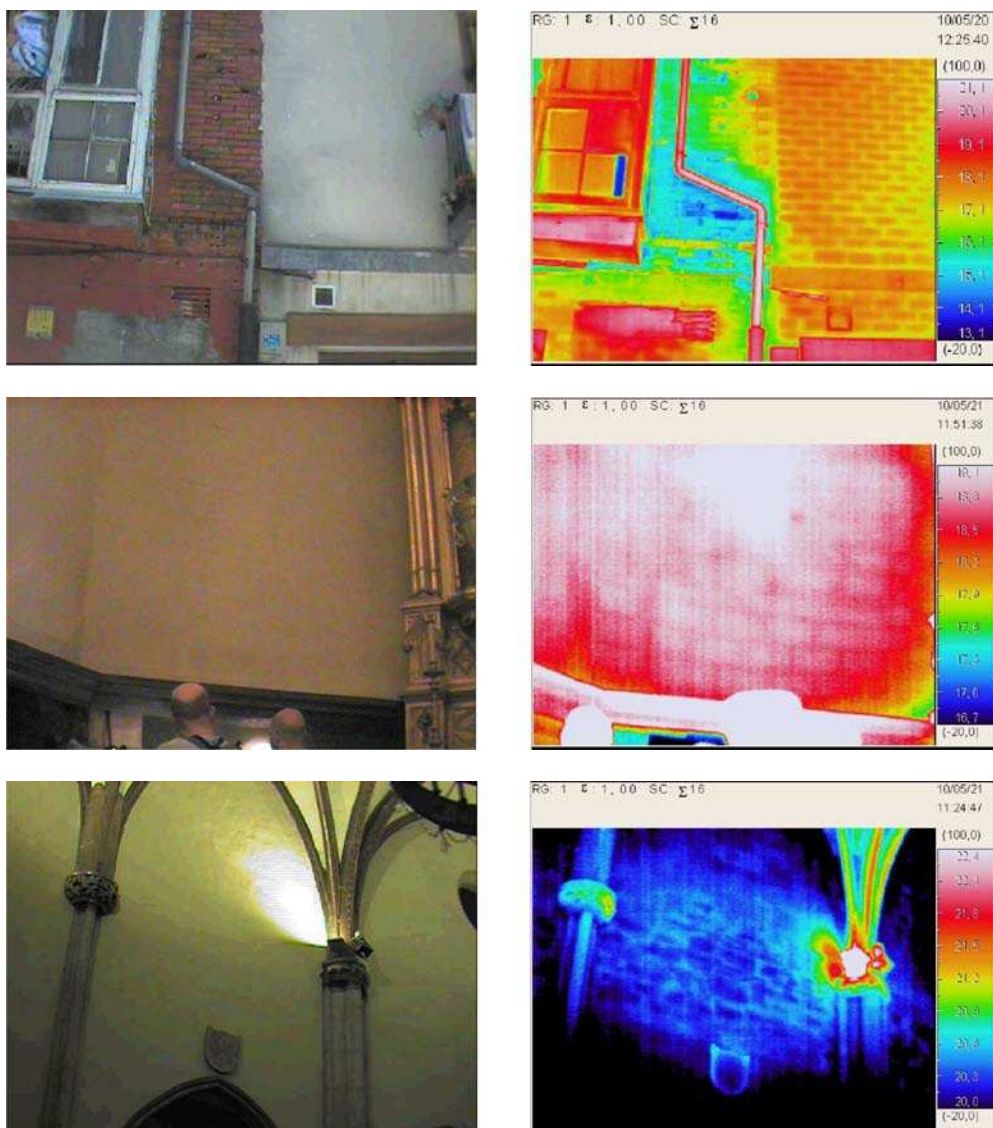


Figura 84. Identificación de distintos tipos de obras de fábrica en paredes enlucidas: ladrillo, sillería y mampostería.



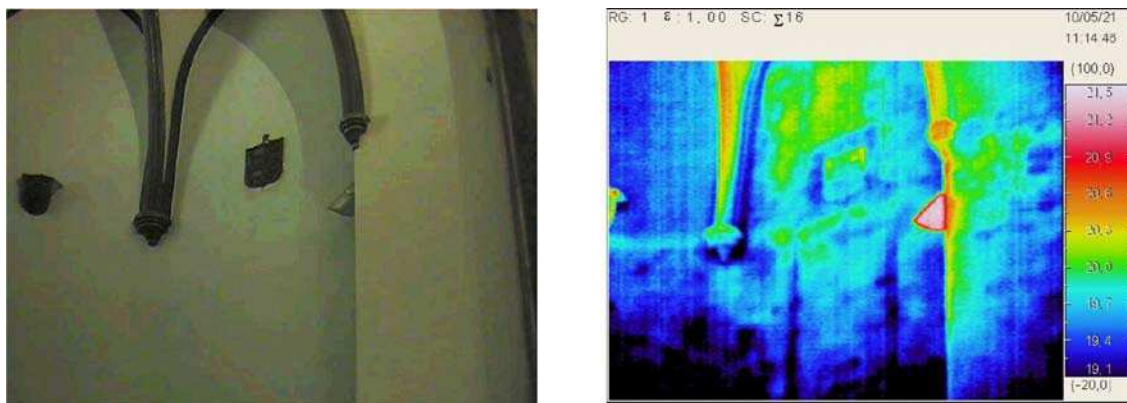


Figura 85. Detección de vano cegado. Se aprecia el recerco que se hizo posiblemente para colocar el escudo e inmediatamente debajo el dintel de lo que podía ser una puerta o ventana. Observando la leyenda de la termografía vemos que estos elementos muestran una temperatura muy baja por lo que se descarta que sean vigas de madera. Una de las posibilidades es que se trate de un marco de sillería.

En la mayor parte de los alzados que están enlucidos, bien con cal o bien con cemento, el tipo de aparejo que se encuentra es sillarejo o ladrillo, lo que por otra parte es lógico ya que no tendría mucho sentido enlucir una pared hecha de sillares. En ocasiones, se aprecian mejor los ladrillos en las paredes enlucidas que en las que están a simple vista, ya que éstas últimas se ven afectadas por otros factores externos (tuberías, respiraderos, cables, etc.) que posiblemente modifiquen el resultado de la termografía.

### Humedades

La unión de la técnica de ultrasonidos y la termografía constituyen una muy buena herramienta para la evaluación *in situ* de las estructuras de madera, ya que permiten obtener en una primera fase de inspección, datos que permiten evaluar el estado de la cubierta de un edificio histórico.

Mientras que con la termografía se detectan los focos de humedad, y por tanto, las zonas sensibles a presentar problemas de pudrición, y pérdidas de densidad, con los ultrasonidos se cuantifica esa pérdida de densidad y resistencia.

Para obtener unos resultados adecuados empleando termografías, es necesario que exista una fuente de estimulación externa, es decir, que se empleen termografías de tipo activo. Los distintos tipos de madera se detectarán debido a la diferencia de densidad en las mismas (Rodríguez Liñán, *et al.* 2011).

El registro de este entramado de madera mediante el escáner, completaría el estudio.

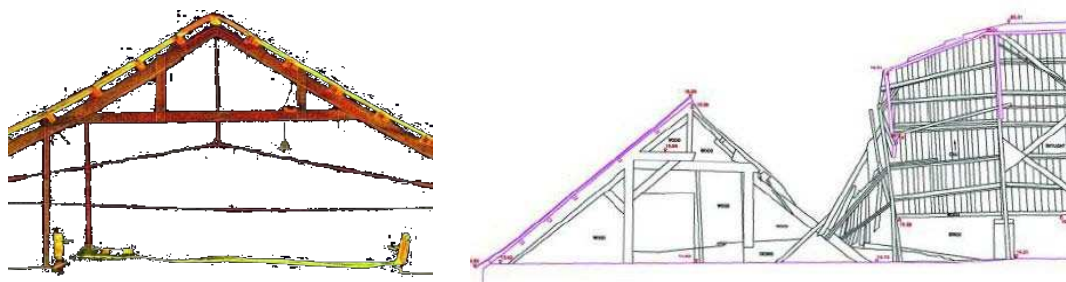


Figura 86. Ejemplo de aplicación del láser escáner en la documentación de estructuras de madera. (English Heritage 2007)

### Termografías métricas

Como veníamos indicando en líneas anteriores, la posibilidad de incorporar las imágenes de infrarrojo sobre una base geométrica, permitirían una mayor precisión en la interpretación de los datos, ya que esta georeferenciación facilitaría la relación de los datos de las termografías con otros de distintas fuentes y naturaleza. Además de las nubes de puntos procedentes de los escáneres, la rectificación de fotografías también supone una interesante base geométrica.

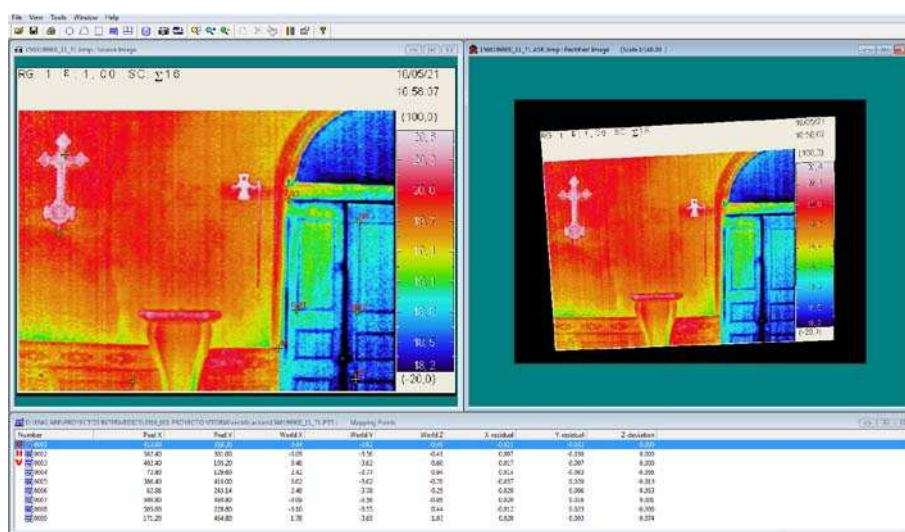


Figura 87. Imagen térmica original y rectificada.

### 6.2.3. Contribución del georadar

La aplicación de técnicas geofísicas, como ya se ha comentado durante el proyecto, tiene a groso modo tres objetivos:

- Determinar la estratigrafía geológica del subsuelo y la continuidad y profundidad de la roca. Los datos sobre la distribución y grosor de estas capas pueden aportar información muy valiosa para la evaluación estructural de edificios.

- ii. Determinar las propiedades físicas de los materiales del subsuelo ya que esta información es importante para la evaluación de la estabilidad de edificios.
- iii. Determinar la existencia de estructuras y/o restos enterrados.

Los avances tecnológicos surgidos en las últimas décadas han propiciado el uso, cada vez mayor, de estas técnicas en trabajos arqueológicos. El carácter no destructivo de las mismas, su alta resolución y el hecho de no alterar la superficie de los yacimientos, hace que el georadar se convierta en una herramienta muy útil en este tipo de proyectos, permitiendo una optimización de costes y tiempos, así como una orientación previa en el proceso de excavación.

El uso del georadar permite la realización de sondeos valorativos de posibles restos arqueológicos de una manera rápida, y no destructiva, ya que no será necesario el movimiento de tierras hasta que no se haya constatado la existencia de dichos vestigios. En el caso en que el rastreo sea positivo, los datos procedentes del georadar permitirán realizar una buena planificación del posterior proceso de excavación, así como una estimación económica y temporal acorde a lo reflejado en los radargramas. En función de la frecuencia de la antena empleada se podrá conocer tanto la resolución de los blancos hallados, como la profundidad máxima a la que se encuentran estos.

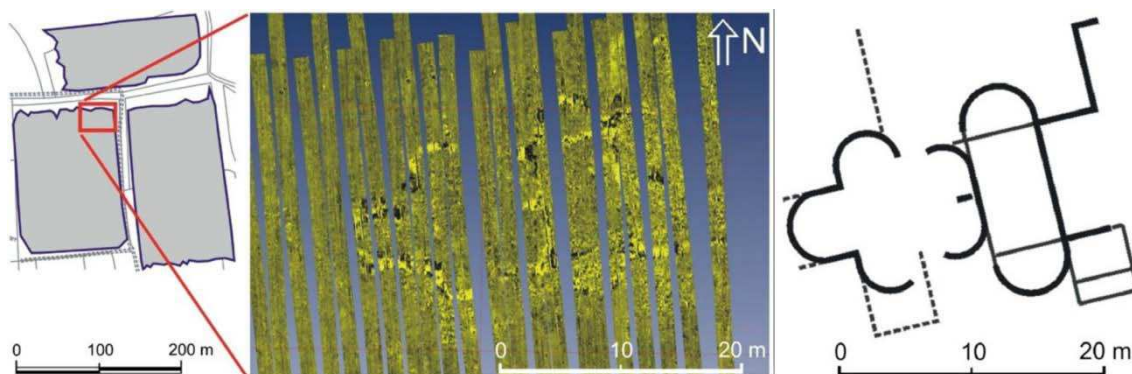


Figura 88. Prospección mediante georadar en una pequeña zona de una parcela rústica, y resultado obtenido tras el procesado de los datos. Se puede apreciar de manera más o menos nítida los restos de una villa romana (norte de Italia).

Como se ha comentado en el apartado 5.1.1., aquellas áreas de baja amplitud normalmente implican zonas con material homogéneo o sedimentario, mientras que aquellas con una gran amplitud suelen corresponder a zonas con una gran contraste físico, y que se asocian con enterramientos, cuevas, restos murarios o cambios estratigráficos significativos (Porsani, *et al.* 2010). El subsuelo de los edificios históricos suele corresponder con esta última situación. En el caso de construcciones religiosas, la mayor parte de ellas albergan antiguos cementerios, criptas, restos de construcciones anteriores, etc., tal como se puede apreciar en la siguiente figura. El conocimiento de estos restos supone una valiosa información no solo para el proyecto de investigación histórica, sino también para la restauración del edificio.



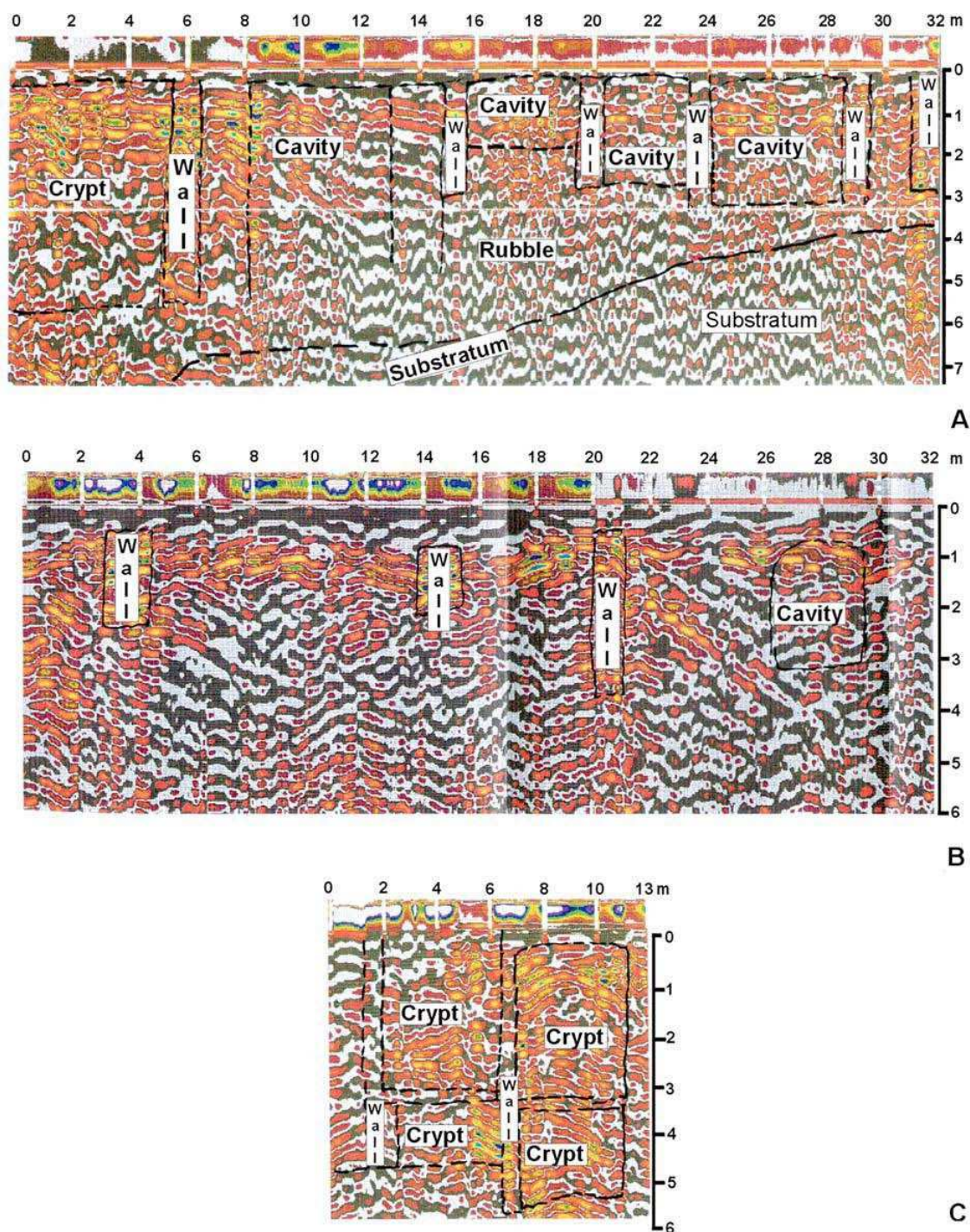


Figura 89. Radargramas obtenidos de la prospección geofísica de la iglesia de St. Agata la Vetere en Catania (Sicilia, Italia). En ellos se aprecian antiguos restos de muros, criptas o enterramientos localizados en el subsuelo del templo, hasta una profundidad de 7.5 metros.

En las investigaciones llevadas a cabo en la Arqueología de la Arquitectura, el edificio se trata de manera global, considerándose un todo, y analizándose simultáneamente la información aportada por los alzados y por el subsuelo. Es decir, restos aparecidos en las excavaciones constatan muchas veces lo analizado en los alzados, y viceversa. En proyectos de lectura estratigráfica de alzados, y donde en ocasiones la excavación arqueológica no es factible por diversos motivos, la realización de perfiles de georadar, tanto en el interior como en el exterior



del edificio, pueden contribuir de manera notable a la investigación y al entendimiento de la evolución constructiva del edificio.

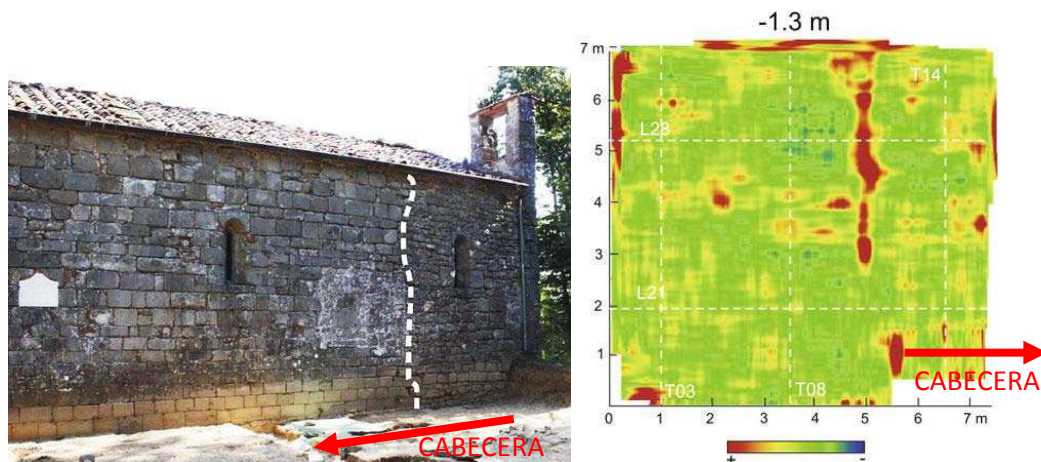


Figura 90. En la imagen izquierda se aprecia una discontinuidad en el alzado que aparece reflejada en el radargrama obtenido en el interior de la iglesia.

Se tiende a pensar en el uso del georadar únicamente en el suelo, pero la técnica GPR ha demostrado ser muy adecuada para el conocimiento y conservación de monumentos históricos, ya que permite la medida del espesor de los muros, la evaluación de daños, el análisis del deterioro sufrido, la detección de pernos metálicos (normalmente empleados para la unión de elementos de época romana con otros medievales), e incluso el estudio de murales o frescos (Masini *et al.* 2010).

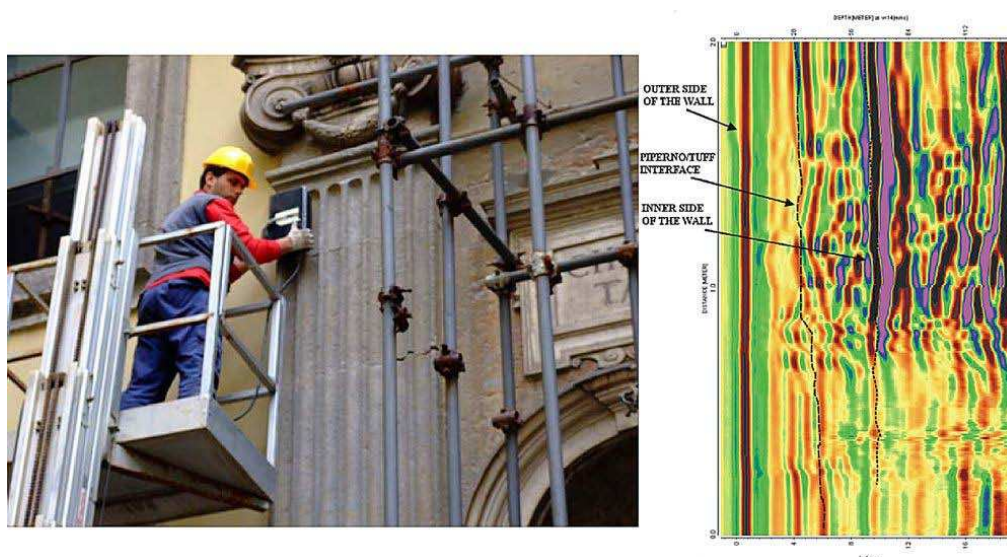


Figura 91. Ejemplo de aplicación de radar en un alzado.

En ocasiones, para obtener toda esta información, se hace necesaria la aplicación de más de una herramienta geofísica, de tal forma que los resultados obtenidos sean eficientes. Sin embargo, es importante evaluar bien esta opción frente al empleo de una única técnica aplicando el método adecuado.

## 7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN





















Una vez finalizado el proyecto, y dado el interés por su continuidad en una futura tesis doctoral, he creído oportuno señalar a continuación algunas de las posibles direcciones en las que se podría realizar dicha investigación y que están directamente relacionadas con el tema tratado a lo largo del trabajo presentado.

- Aplicación de técnicas no destructivas (TND) al estudio de elementos patrimoniales de diversa naturaleza.
- Arqueología virtual: estudio de un edificio histórico según la Arqueología de la Arquitectura disponiendo únicamente de información proporcionada por TNDs.
- Integración de datos procedentes de distintos sensores empleados por las TND en una única plataforma gráfica.
- Integración de las nubes de puntos procedentes del laser escáner en un Sistema de Información Geográfico o Patrimonial.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 📖 Astarita, T., Cardone, G., Carlomagno, G.M., Meola, C., 2000. A survey on infrared thermography for convective heat transfer measurements. *Optics & Laser Technology* 32 (7-8), 593-610.
- 📖 Avdelidis, N.P., Moropoulou, A., 2004. Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures. *Journal of Cultural Heritage* 5 (1), 119-127.
- 📖 Azkarate Garai-Olaun, A., Caballero Zoreda, L., Quirós Castillo, J., 2002. Arqueología de la Arquitectura: definición disciplinar y nuevas perspectivas. *Arqueología de la Arquitectura* 0(1) 7-10.
- 📖 Azkarate, A., Cámara, L., Lasagabaster, J.I., Latorre, P., 2001. Plan Director de Restauración de la Catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz. Diputación Foral de Álava, Vitoria-Gasteiz.
- 📖 Bahn, P., 1998. Arqueología. Teorías, métodos y práctica. Akal, Madrid.
- 📖 Balageas, D.L., Termografía infrarroja: una técnica multifacética para la evaluación no destructiva (END). Buenos Aires ed. Anonymous.
- 📖 Balaras, C.A., Argiriou, A.A., 2002. Infrared thermography for building diagnostics. *Energy and Buildings* 34 (2), 171-183.
- 📖 Barber, D., Mills, J., Bryan, P., 2003. Towards a standard specification for terrestrial laser scanning of cultural heritage. 19th Symposium of CIPA.
- 📖 Barone, G., Branca, C., Gresta, S., Imposa, S., Leone, A., Majolino, D., 2004. Geoarcheometric and geophysical methodologies applied to the study of cultural heritage: "St. Agata la Vetere" in Catania (Sicily, Italy). *Journal of Cultural Heritage* 5 (3), 263-271.
- 📖 Barreira, E., de Freitas, V.P., 2007. Evaluation of building materials using infrared thermography. *Construction and Building Materials* 21 (1), 218-224.
- 📖 Binda, L., Saisi, A., Tiraboschi, C., 2000. Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries. *Construction and Building Materials* 14 (4), 199-233.
- 📖 Bini, M., Fornaciari, A., Ribolini, A., Bianchi, A., Sartini, S., Coschino, F., 2010. Medieval phases of settlement at Benabbio castle, Apennine mountains, Italy: evidence from Ground Penetrating Radar survey. *Journal of Archaeological Science* In Press, Corrected Proof 3059-3067.
- 📖 Boehler, W., Marbs, A., 2003. Investigating laser scanner accuracy. 19th Symposium of CIPA.
- 📖 Boehler, W., Marbs, A., 2002. 3D scanning instruments. CIPA, Heritage Documentation-International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording.
- 📖 Bosiljkov, V., Uranjek, M., Žarnić, R., Bokan-Bosiljkov, V., 2010. An integrated diagnostic approach for the assessment of historic masonry structures. *Journal of Cultural Heritage* 11 (3), 239-249.
- 📖 Bryan, P., 2006. An addendum to the metric specifications for Cultural Heritage-the collection and archiving of point cloud data obtained by terrestrial laser scanning or others methods.
- 📖 Bryan, P., Bedford, J., 2009. Metric survey specifications for Cultural Heritage.
- 📖 Calyecac Marreos, F., Escáner 3D mediante triangulación y luz estructurada para reconstrucción de piezas arqueológicas. 1-80.
- 📖 Conyers, L.B., Goodman, D., 1997. Ground-penetrating radar. An introduction for archaeologists. Altamira Press, Walnut Creek, California (USA).



-  Corns, A., Shaw, R., 2009. High resolution 3-dimensional documentation of archaeological monuments & landscapes using airborne LiDAR. *Journal of Cultural Heritage* 10 (Supplement 1), e72-e77.
-  Cuadrat, J.M., Pita, M.F., 2000. *Climatología*, Madrid.
-  English Heritage, 2007. 3D Laser scanning for Heritage. Advice and guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture.
-  Francese, R.G., Finzi, E., Morelli, G., 2009. 3-D high-resolution multi-channel radar investigation of a Roman village in Northern Italy. *Journal of Applied Geophysics* 67 (1), 44-51.
-  Francovich, R., Manacorda, D., 2001. *Diccionario de arqueología*. Crítica, Barcelona.
-  Gambín, B., Sáez de Ocáriz, I., Alonso, F., 2005. Diferentes técnicas end mediante termografía infrarroja: aplicaciones en la industria aeroespacial. *Dyna* 80 (4), 35-38.
-  García Gómez, I., 2005. Santa Eulalia de Marquinez. Evolución histórico-constructiva, Arabarri- Sociedad Anónima de Gestión del Patrimonio Edificado en Álava, Vitoria.
-  García Gómez, I., Domínguez Beltrán de Heredia, Idoia Carlota, Fernández de Gorostiza López de Viñaspre, Miren, Gómez Calvo, E., Martínez Montecelo, Á., Mesanza Moraza, A., et al., 2010. La cronotipología aplicada al estudio y conservación de los cascos históricos. 1-575.
-  García Gómez, I., Sánchez Pinto, I., 2009. La torre de Martiartu (Erandio, Bizkaia). 197.
-  Gómez López, R., 2008. Aplicación del radar de penetración en tierra (georadar) a la explotación no destructiva de yacimientos arqueológicos. 136.
-  González Fernández, D.A., 2006. Contribuciones a las técnicas no destructivas para evaluación y prueba de procesos y materiales basadas en radiaciones infrarrojas.
-  Gottwald, R., 2008. Field procedures for testing terrestrial laser scanners (TLS). A contribution to a future ISO standard. FIG Working Week. 1-14.
-  Haralambopoulos, D.A., Paparsenos, G.F., 1998. Assessing the thermal insulation of old buildings—The need for in situ spot measurements of thermal resistance and planar infrared thermography. *Energy Conversion and Management* 39 (1-2), 65-79.
-  Harris, E.C., 1989. *Principios de estratigrafía arqueológica*. Crítica,.
-  Iñiguez González, G., 2007. Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural.
-  Kopácyk, A., Korbasove, M., 2004. Optimal configuration of standpoints by application of laser terrestrial scanners. *INGEO 2004 and FIG* 1-9.
-  Lagüela, S., González-Jorge, H., Armesto, J., Arias, P., 2011a. Calibration and verification of thermographic cameras for geometric measurements. *Infrared Physics & Technology* 54 (2), 92-99.
-  Lagüela, S., Martínez, J., Armesto, J., Arias, P., 2011b. Energy efficiency studies through 3D laser scanning and thermographic technologies. *Energy and Buildings* 43 (6), 1216-1221.
-  Lerma García, J.L., Biosca Tarongers, J.M., 2008. Teoría y práctica del escaneado láser terrestre. 254.
-  Leucci, G., Cataldo, R., De Nunzio, G., 2007. Assessment of fractures in some columns inside the crypt of the Cattedrale di Otranto using integrated geophysical methods. *Journal of Archaeological Science* 34 (2), 222-232.

- 📖 Lichti, D.D., 2000. Calibration and testing of a terrestrial scanner. *Photogrammetry and Remote Sensing* XXXIII 485-492.
- 📖 Lichti, D., Gordon, S., 2004. Error propagation in directly georeferenced terrestrial laser scanner point clouds for Cultural Heritage recording. FIG Working Week. Modelling and visualization.
- 📖 Lignola, G.P., Manfredi, G., 2010. A combination of NDT methods for the restoration of monumental façades: The case study of Monte di Pietà (Naples, Italy). *Journal of Cultural Heritage* 11 (3), 360-364.
- 📖 Lombillo, I., Villegas, L., 2008. Metodologías no destructivas aplicadas a la rehabilitación estructural del patrimonio. Anonymous pp. 1-23.
- 📖 Lopetegi Galarraga, A., Rodríguez Miranda, A., Valle Melón, J.M., 2006. Estructura de metadatos: Idgp\_metadata\_v0.1. Laboratorio de Documentación geométrica del Patrimonio. UPV-EHU.
- 📖 Luhmann, T., Ohm, J., Piechel, J., Roelfs, T., 2010. Geometric calibration of thermographic cameras. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 38 411-416.
- 📖 Luis Ruiz, J.M.d., 2010. Contraste en la ejecución de auscultaciones geodésicas por métodos clásicos y con láser escáner.
- 📖 Maierhofer, C., Arndt, R., Röllig, M., Rieck, C., Walther, A., Scheel, H., et al., 2006. Application of impulse-thermography for non-destructive assessment of concrete structures. *Cement and Concrete Composites* 28 (4), 393-401.
- 📖 Maijala, P., 1992. Application of some seismic data processing methods to ground penetrating radar data. *Rovamieni (Finlandia)* ed. Anonymous pp. 103-110.
- 📖 Martín Gutiérrez, J., 2004. Análisis del subsuelo utilizando técnicas geofísicas. Sistema Georadar RAMAC/GPR, 1st ed. In: *TopCart 2004 [Archivo de ordenador]*, Anonymous Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía de Madrid, pp. 87-88.
- 📖 Martin Zogg, H., 2008. Investigations of high precision terrestrial laser scanning with emphasis on the development of a robust close-range 3D laser scanning system. 1-185.
- 📖 Masini, N., Persico, R., Rizzo, E., 2010. Some examples of GPR prospecting for monitoring of the monumental heritage. *Journal of Geophysics and Engineering* 7 190-199.
- 📖 Masini, N., Persico, R., Pagliuca, A., 2008. A multifrecuence and multisensor approach for the study and the restoration of monuments: the case of the Cathedral of Matera. *Advances in Geosciences* 19 17-22.
- 📖 Meola, C., Di Maio, R., Roberti, N., Carlomagno, G.M., 2005. Application of infrared thermography and geophysical methods for defect detection in architectural structures. *Engineering Failure Analysis* 12 (6), 875-892.
- 📖 Novo, A., Lorenzo, H., Rial, F.I., Solla, M., 2009. From pseudo 3d to full-resolution GPR imaging in archaeology. *IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium*.
- 📖 Nuñez Andrés, A., Buill Pozuelo, F., Muñoz Salinas, F., Comportamiento de un sensor láser escáner. Barcelona. 6ª Semana Geomatica. ed. Anonymous 2005.
- 📖 Orbán, Z., Gutermann, M., 2009. Assessment of masonry arch railway bridges using non-destructive in-situ testing methods. *Engineering Structures* 31 (10), 2287-2298.
- 📖 Ortiz, G., Crespo, T.M., 2008. Aplicación del la técnica de georadar a los riegos naturales: fundamnetos, metodología, procesado e interpretación de datos. Anonymous pp. 205-229.

- 📖 Pérez Gracia, María de la Vega, 2001. Radar de subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico.
- 📖 Pérez-Gracia, V., Caselles, J.O., Clapes, J., Osorio, R., Martínez, G., Canas, J.A., 2009. Integrated near-surface geophysical survey of the Cathedral of Mallorca. *Journal of Archaeological Science* 36 1289-1299.
- 📖 Porsani, J.L., de Matos Jangelme, G., Kipnis, R., 2010. GPR survey at Lapa do Santo archaeological site, Lagoa Santa karstic region, Minas Gerais state, Brazil. *Journal of Archaeological Science* 37 (6), 1141-1148.
- 📖 Puente Crespo, J.d.I., Rodríguez Rodríguez, F.J., 2004. Inspección termográfica de fachadas de edificios. Comentarios a la norma europea EN 13187, 1st ed. Anonymous Universidad de Oviedo, Servicio de Publicaciones, pp. 206-214.
- 📖 Reshetyuk, Y., 2006. Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners. 1-152.
- 📖 Richards, J., 2009. From anarchy to good practice: the evolution of standards in archaeological computing. *Archeologia e calcolatori* 20 27-35.
- 📖 Rodríguez Abad, I., 2009. Evaluación de la técnica no destructiva del georadar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera. 1-421.
- 📖 Rodríguez Liñán, C., Morales Conde, M.J., Rubio de Hita, P., Pérez Gálvez, F., 2011. Inspección mediante técnicas no destructivas de un edificio histórico: oratorio San Felipe Neri (Cádiz). *Informes de la Construcción*. 63 13-22.
- 📖 Rodríguez Miranda, A., Lopetegi Galarraga, A., Valle Melón, J.M., 2008. Time transcendence, metadata and future utilization in 3D models of point clouds for heritage elements. Anonymous Burdeos, 2008,.
- 📖 Roskams, S., 2003. Teoría y práctica de la excavación. Crítica, Barcelona.
- 📖 Staiger, R., 2005. The Geometrical Quality of Laser Scanner (TLS). FIG Working Week.
- 📖 Tabales Rodríguez, M.Á., 1997. Análisis arqueológico de paramentos. Aplicaciones en el patrimonio edificado sevillano. 6 263-295.
- 📖 Trinks, I., Johansson, B., Gustafsson, J., Emilsson, J., Friborg, J., Gustafsson, C., et al., 2010. Efficient, large-scale Archaeological prospection using a true three-dimensional ground-penetrating radar array system. *Archaeological Prospection* 17 175-186.
- 📖 Vega Fidalgo, L.M., Zorita Téllez, D., Infrasonidos y ultrasonidos.
- 📖 Young, H.D., Freedman, R.A., 2009. Física Universitaria, con física moderna. 12ª ed. Pearson Educación.

## 9. ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1. Diferentes tipos de ensayos aplicados en la restauración de la Catedral de Santa María, en Vitoria-Gasteiz. (Azkarate, et al. 2001).....	7
Figura 2. Onda luminosa con el campo eléctrico en vertical y el campo magnético en horizontal. (Luis Ruiz 2010).....	10
Figura 3. Espectro electromagnético. (Young and Freedman 2009).....	11
Figura 4. Frente de una onda electromagnética. (Young and Freedman 2009).....	12
Figura 5. Proceso de reflexión, refracción y pérdida de energía de una onda. <i>Elaboración propia a partir de (Martín Gutiérrez 2004)</i> .....	13
Figura 6. Representación de la reflexión en dos medios. A la izquierda representación con varios rayos, y a la derecha representación simplificada. (Young and Freedman 2009).....	13
Figura 7. Tipos de reflexión. (Young and Freedman 2009).....	14
Figura 8. Leyes de reflexión y refracción.....	14
Figura 9. Radargramas correspondientes a tres líneas de medida realizadas en el mismo lugar pero en diferentes momentos del año. (Gómez López 2008).....	16
Figura 10. Tres procesos de iteración entre un átomo y ondas electromagnéticas. (Young and Freedman 2009).....	20
Figura 11. Esquema de un láser. (García Gómez, et al. 2010) .....	21
Figura 12. Interferómetro de Michelson.....	21
Figura 13. Esquema de funcionamiento de un equipo de georadar y sus componentes fundamentales.....	27
Figura 14. Antenas apantalladas y no apantalladas (Gómez López 2008) (Martín Gutiérrez 2004).....	29
Figura 15. Sistema georadar modular empleado en la prospección de un yacimiento arqueológico en Suiza. (Trinks, et al. 2010) .....	29
Figura 16. Equipo georadar multicanal de alta resolución 3D empleado en la prospección de una villa romana al norte de Italia. (Francese, et al. 2009) .....	30
Figura 17. Procedimiento de calibración del radargrama obtenido. (Porsani, et al. 2010) (Ortiz and Crespo 2008).....	31
Figura 18. Obtención de datos mediante el método del punto de reflexión común. (Martín Gutiérrez 2004).....	31

Figura 19. Aspectos que hay que considerar antes de comenzar cualquier proyecto.....	32
Figura 20. Litologías que forman el subsuelo.....	33
Figura 21. Representación de los datos mediante trazas o mediante escalas de color. ( <i>Ortiz and Crespo 2008</i> ).....	34
Figura 22. Adquisición de datos en un muro o superficie vertical mediante transiluminación. ( <i>Martín Gutiérrez 2004</i> ).....	36
Figura 23. Resultados de la tomografía GPR. ( <i>Martín Gutiérrez 2004</i> ).....	37
Figura 24. Adquisición de datos con el método WARR. ( <i>Martín Gutiérrez 2004</i> ).....	37
Figura 25. Estudio de sondeos utilizando antenas biestáticas. ( <i>Pérez Gracia, María de la Vega 2001</i> ) .....	38
Figura 26. Cabecera de un registro obtenido con el georadar y la traza correspondiente a dicha cabecera. ( <i>Pérez Gracia, María de la Vega 2001</i> ).....	39
Figura 27. Radargrama original y corregido del origen de tiempos. ( <i>Gómez López 2008</i> ).....	40
Figura 28. Ejemplo de aplicación de ganancia. ( <i>Pérez Gracia, María de la Vega 2001</i> ).....	41
Figura 29. Esquema de formación de hipérbolas al detectar pequeños objetos. ( <i>Pérez Gracia, María de la Vega 2001</i> ).....	42
Figura 30. Efecto que producen las correcciones topográficas sobre un registro de campo dado un perfil concreto. ( <i>Pérez Gracia, María de la Vega 2001</i> ).....	42
Figura 31. Ejemplo de la secuencia de procesado de un radargrama realizado en una duna. ( <i>Ortiz and Crespo 2008</i> ).....	43
Figura 32. Ejemplo de representación de las medidas obtenidas con el georadar: A, B y C-Scans. ( <i>Gómez López 2008</i> ).....	45
Figura 33. Esquema del proceso seguido en un estudio con georadar, desde la planificación hasta la obtención de los resultados finales. Elaboración propia a partir de ( <i>Pérez Gracia, María de la Vega 2001</i> ).....	46
Figura 34: Radiación detectada por un equipo de medición. <i>Manual Fluke</i> .....	48
Figura 35. Diferencias entre el comportamiento de un cuerpo negro (izquierda) y un cuerpo real. ....	48
Figura 36. Diseño de una cámara térmica. <a href="http://www.academiatesto.com.ar/cms/inicio">www.academiatesto.com.ar/cms/inicio</a> .....	50
Figura 37. IFOV, IFOVmeas y FOV de una cámara termográfica.....	51
Figura 38. Ejemplo de una taza metálica con una cinta adhesiva pegada y termografía obtenida.....	53

Figura 39. Diferentes tipos de patrones empleados en la calibración de cámaras térmicas. (Luhmann, et al. 2010) y (Lagüela, et al. 2011).....	53
Figura 40 Imagen visible, imagen infrarroja, y detalle de una de las dianas colocadas en la imagen térmica. (García Gómez, et al. 2010).....	54
Figura 41. Imagen térmica y visible de un detalle de un alzado. (García Gómez, et al. 2010) .....	55
Figura 42. Técnicas de registro tridimensional en función de la escala y el tamaño-complejidad del objeto. (English Heritage 2007).....	61
Figura 43. Aplicaciones del láser escáner en función del equipo empleado. Elaboración propia a partir de (Lerma García and Biosca Tarongers 2008).....	63
Figura 44. Escáner de triangulación. (Lerma García and Biosca Tarongers 2008).....	64
Figura 45. Diferentes técnicas empleadas en los escáneres de triangulación. (Lerma García and Biosca Tarongers 2008).....	65
Figura 46. Ejemplo de adquisición de datos con un escáner de triangulación. (Calyecac Marreos).....	65
Figura 47. Principio de un láser escáner basado en el tiempo de vuelo. (Lerma García and Biosca Tarongers 2008).....	66
Figura 48. Detalle del espejo que actúa como unidad de desviación del haz láser. Escáner FARO. (García Gómez, et al. 2010)).....	67
Figura 49. Modos de desviación del haz láser. (Martin Zogg 2008) .....	67
Figura 50. Principio de medición basado en la diferencia de fase. (Lerma García and Biosca Tarongers 2008).....	68
Figura 51. Ejemplo de las ventajas que puede aportar la documentación de yacimientos mediante LiDAR frente a otras técnicas. (Corns and Shaw 2009) .....	69
Figura 52. Estructura de la norma ISO 17123.....	73
Figura 53. Laboratorio de calibración. (Luis Ruiz 2010).....	74
Figura 54 Campo de visión y ejes del escáner C10 de Leica. Leica.....	75
Figura 55. Distribución de dos escaneos de una misma habitación desde dos puntos de vista distintos. (García Gómez, et al. 2010)) .....	77
Figura 56. Proceso de distribución de señales de referencia a distintas alturas antes de comenzar el escaneo. (García Gómez, et al. 2010).....	77
Figura 57. Tipos de dianas artificiales.....	78



Figura 58. Registro de las coordenadas de las dianas con estación total a medida que se va avanzando con el escaneo. ( <i>García Gómez, et al. 2010</i> ).....	78
Figura 59. Huellas del láser según el ángulo de escaneo. ( <i>Lerma García and Biosca Tarongers 2008</i> ).....	79
Figura 60. Fuentes de error en la medida con láser escáner. ( <i>Staiger 2005</i> ) .....	81
Figura 61. Puntos fugados en la medida con el láser escáner. (Bryan and Bedford 2009).....	82
Figura 62. Vista planar del escaneado de la sacristía de la iglesia de San Miguel (Vitoria-Gasteiz). ( <i>García Gómez, et al. 2010</i> ) .....	83
Figura 63. Efectos de la refracción en materiales semitransparentes.....	84
Figura 64. Ejemplo de zona sin registro de puntos debido a las bajas temperaturas en las que se realizó el proyecto. ( <i>García Gómez, et al. 2010</i> ).....	84
Figura 65. Automatización de las fases del procesamiento de un escaneado láser terrestre. ( <i>Lerma García and Biosca Tarongers 2008</i> ).....	85
Figura 66. Modelos 3D de nubes de puntos. ( <i>García Gómez, et al. 2010</i> ) .....	85
Figura 67. Fichero ASCII de una nube de puntos. ( <i>García Gómez, et al. 2010</i> ) .....	86
Figura 68. Puntos erróneos debido a la paso de personas durante el escaneo (izquierda) y debido a las malas condiciones climatológicas. ( <i>García Gómez, et al. 2010</i> ) .....	86
Figura 69. Sistema sónico aplicado a una pared. ( <i>Lombillo and Villegas 2008</i> ).....	91
Figura 70. Sección vertical de un yacimiento arqueológico. ( <i>Harris 1989</i> ) .....	94
Figura 71. Lectura de alzados. ( <i>García Gómez 2005</i> ) .....	94
Figura 72. Alzado sur (interior y exterior) de la torre de Martiartu (Bizkaia). ( <i>García Gómez and Sánchez Pinto 2009</i> ) .....	95
Figura 73. Forro de sillería cubriendo la obra original (izquierda) y revoco de cal (derecha).....	95
Figura 74. Estructura de madera de la bajo cubierta de una iglesia.....	96
Figura 75. Representación sobre la base fotogramétrica de distintas cartografías temáticas. ( <i>Azkarate, et al. 2001</i> ).....	97
Figura 76. Lectura estratigráfica de alzados y mapa de inclinación realizados sobre la nube de puntos obtenida con el láser escáner. ( <i>García Gómez, et al. 2010</i> ).....	98
Figura 77. Ortotermograma obtenido de la nube de puntos. ( <i>Lagüela, et al. 2011b</i> ).....	99

Figura 78. Imagen visible y térmica de un alzado enfoscado. ( <i>García Gómez, et al. 2010</i> ).....	99
Figura 79. Imágenes visibles y térmicas de edificios con estructura de hormigón. ( <i>García Gómez, et al. 2010</i> ).....	100
Figura 80. Identificación de litologías en la imagen infrarroja. ( <i>García Gómez, et al. 2010</i> )....	101
Figura 81. Comportamiento térmico desigual de los materiales. ( <i>García Gómez, et al. 2010</i> ).101	
Figura 82. Fachadas enlucidas. ( <i>García Gómez, et al. 2010</i> ).....	102
Figura 83. Vanos cegados en un inmueble enlucido y comprobación de su anterior existencia. ( <i>García Gómez, et al. 2010</i> ).....	102
Figura 84. Identificación de distintos obras de fabrica en paredes enlucidas( <i>García Gómez, et al. 2010</i> ).....	103
Figura 85. Detección de vanos cegados. ( <i>García Gómez, et al. 2010</i> ).....	104
Figura 86. Aplicación del laser escáner en la documentación de estructuras de madera. ( <i>English Heritage 2007</i> ).....	105
Figura 87. Imagen térmica rectificada. ( <i>García Gómez, et al. 2010</i> ).....	105
Figura 88. Prospección mediante georadar de una parcela rústica, y resultado obtenido tras el procesado de los datos. ( <i>Francesse, et al. 2009</i> ).....	106
Figura 89. Radargramas obtenidos de la prospección geofísica de la iglesia de St. Agata la Vetere” en Catania (Sicilia, Italia). ( <i>Barone, et al. 2004</i> ).....	107
Figura 90. En la imagen izquierda se aprecia una discontinuidad en el alzado que aparece reflejada en el radargrama obtenido en el interior de la iglesia. ( <i>Bini, et al. 2010</i> ).....	108
Figura 91. Ejemplo de aplicación de radar en un alzado. ( <i>Lignola and Manfredi 2010</i> ).....	108

Tabla 1. Esquema de los principales métodos no destructivos empleados. ( <i>Orbán and Gutermann 2009</i> ).....	9
Tabla 2. Grado de atenuación de algunos materiales. ....	15
Tabla 3. Listado de los valores aproximados de la constante dieléctrica de las litologías más representativas. ( <i>Ortiz and Crespo 2008</i> ).....	16
Tabla 4. Bandas de frecuencia y longitudes de onda correspondientes a cada banda para la propagación en el vacío. ( <i>Rodríguez Abad 2009</i> ).....	28
Tabla 5. Coeficiente de emisividad para algunos materiales. <i>IMPIC termografía infrarroja SL</i> .....	49
Tabla 6. Resolución térmica par un rango dinámico de 200°C en función del número de bits utilizados en la digitalización de las señales. ( <i>Orbán and Gutermann 2009</i> ).....	51
Tabla 7. Propiedades térmicas de materiales de construcción y aislantes. <i>Miliarium.com Ingeniería Civil y Medio Ambiente</i> .....	60
Tabla 8. Fotografías de algunos de los escáneres más utilizados clasificados según su sistema de medida.....	70
Tabla 9. Especificaciones técnicas de algunos modelos de escáneres.....	71
Tabla 10. Precisión, uso y alcance de los distintos tipos de escáneres del mercado. ( <i>English Heritage 2007</i> ) .....	76
Tabla 11. Precisiones aceptables según la escala de trabajo para el English Heritage ( <i>Bryan and Bedford 2009</i> ).....	76
Tabla 12. Ejemplos de distintas resoluciones para el escáner <i>FARO LS880</i> .....	79
Tabla 13. Densidad de escaneo en función del objeto más pequeño a documentar. ( <i>English Heritage 2007</i> ).....	80
Tabla 14. Algunos de los software comerciales diseñados para trabajar con nubes de puntos..	89
Tabla 15. Velocidad de propagación de los ultrasonidos en distintos tipos de rocas. ( <i>Lombillo and Villegas 2008</i> ).....	90

